

Měření přesnosti a stability mechanických hodinek

Measurement of accuracy and stability of mechanical watches

Jakub Kubis

Bakalářská práce

Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Bilík, Ph.D.

Ostrava, 2021

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou/diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: *30. dubna 2021*

.....
podpis studenta

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu práce doc. Ing. Petru Bilíkovi, Ph.D. za vedení, inspirující podněty i vstřícnou pomoc při psaní mé bakalářské práce.

Abstrakt

Tato bakalářská práce si klade za cíl rozebrat problematiku měření akustických signálů mechanických hodinek a jejich zpracování pro účely měření. Teoretický rozbor představuje úvod do měření tichých signálů a jsou zde popsány nejpoužívanější snímače vhodné pro měření. Součástí této části je i vysvětlení principu převodu analogového signálu na diskrétní pro účely dalšího zpracování. Velká část práce je věnována podrobné analýze principu vzniku zvukového signálu v hodinovém mechanismu a nejčastějším závadám, které se ve zvukovém signálu hodinek projevují. Popsána jsou zde rovněž vývojová prostředí pro tvorbu virtuálních měřicích přístrojů s důrazem na LabVIEW. V praktické části je proveden návrh virtuálního měřicího přístroje určeného pro měření přesnosti chodu hodinového stroje.

Klíčová slova

měření času, LabVIEW, hodiny, akustika, měření frekvence, měření tichých akustických signálů, mikrofon, zpracování signálu

Abstract

This bachelor thesis is focused on measurement of the acoustic signals of the mechanical watches and its signal processing for the analysis. Theoretical article introduces to low-level sound measurement issues and represents the most common sensors suitable for the measurement. This article also explains the principles of conversion of analog to digital signal. In this part the principles of sound generation in watch movement are clarified together with the basic defect diagnostics, which can be measured in sound signal. Also, the integrated development environment for the virtual instrumentation with the LabVIEW system description are set forth. The implementation of the practical watchmaker virtual instrument for the diagnostics of the watch movement mechanism is written in the practical section.

Key words

time measurement, LabVIEW, watches, acoustics, frequency measurement, low-level acoustic signals, microphone, signal processing

Obsah

| | |
|---|----|
| Seznam použitých symbolů a zkratek..... | 8 |
| Seznam ilustrací a tabulek..... | 10 |
| Úvod | 12 |
| 1 Problematika měření slabých akustických signálů | 13 |
| 1.1 Snímače akustických signálů | 13 |
| 1.1.1 Kontaktní měření | 13 |
| 1.1.2 Bezkontaktní měření..... | 14 |
| 1.2 Přehled nejdůležitějších vlastností mikrofonů | 14 |
| 1.3 Typy mikrofonů..... | 16 |
| 1.4 Úprava signálu v měřicím řetězci | 19 |
| 1.4.1 Převod analogového zvukového signálu na diskrétní | 19 |
| 1.4.2 Spektrální analýza..... | 21 |
| 1.4.3 Digitální filtrace..... | 21 |
| 2 Teoretický rozbor problematiky akustických projevů mechanických hodin | 23 |
| 2.1 Kotvový krok..... | 23 |
| 2.2 Akustický signál hodinek | 24 |
| 2.3 Základní diagnostika stavu hodinového stroje | 25 |
| 2.3.1 Denní odchylka chodu | 26 |
| 2.3.2 Asymetrický chod (kulhání) | 27 |
| 2.3.3 Rozkmit setrvačky | 27 |
| 2.3.4 Zobrazení „vibrografu“ | 29 |
| 3 Popis vývojových prostředí pro tvorbu měřicích systémů | 32 |
| 3.1 Vývojové prostředí LabVIEW | 32 |
| 4 Návrh řešení měření..... | 35 |
| 4.1 Výběr vhodného snímače | 35 |
| 4.2 Návrh virtuálního přístroje | 37 |
| 4.2.1 Nastavení vzorkovacích parametrů | 37 |
| 4.2.2 Filtrace signálu..... | 38 |
| 4.2.3 Odstranění šumu | 40 |
| 4.2.4 Normalizace signálu..... | 41 |
| 4.2.5 Hledání lokálních maxim..... | 43 |
| 4.2.6 Výpočet hodnot | 43 |
| 4.2.7 Výpočet rozkmitu setrvačky | 44 |
| 4.2.8 Provedení zobrazení vibrografu | 44 |
| 4.2.9 Srovnání s továrně vyráběným přístrojem | 45 |
| 4.2.10 Ověření přesnosti | 47 |
| Závěr | 49 |

| | |
|---------------------|----|
| Literatura | 50 |
| Seznam příloh | 52 |

Seznam použitých symbolů a zkratek

| Symbol | Jednotka | Význam symbolu |
|-----------------|-----------------|---|
| \div | — | znak pro celočíselné dělení |
| A | ° | rozkmit setrvačky |
| a_i | — | soubor reverzních koeficientů digitálního filtru |
| B | h^{-1} | počet kyvů setrvačky za hodinu |
| b_k | — | soubor přímých koeficientů digitálního filtru |
| C_0 | F | kapacita mikrofону v klidu |
| d | m | vzdálenost mezi deskami kondenzátoru |
| dt | s | časový interval mezi dvěma vzorky, vzorkovací perioda |
| $e(t)$ | — | chybový signál |
| F | Hz | frekvence tikotu hodinek |
| f_{\max} | Hz | maximální žádoucí frekvence v signálu |
| f_{vz} | Hz | vzorkovací frekvence |
| G | dB | napěťové zesílení kombinace mikrofону a předzesilovače |
| L_{ak} | W | měřitelný akustický výkon |
| $\max(u)$ | — | maximum z definované množiny u |
| N | — | počet možných napěťových hodnot v D/A převodníku |
| n | — | šířka slova D/A převodníku |
| n_{ef} | — | efektivní hodnota šumu |
| $n_n(t)$ | — | nestacionární náhodná část signálu |
| $n_s(t)$ | — | stacionární náhodná část signálu |
| P | W | výkon signálu |
| p_0 | Pa | vztažná hodnota akustického tlaku |
| p_a | Pa | minimální hodnota akustického tlaku |
| P_N | W | výkon šumu |
| r | —, ms | amplituda okna vibrografu |
| S | m^2 | plocha desek kondenzátoru |
| $s(t)$ | — | signál pocházející od měřeného zdroje |
| S_0 | dB | citlivost mikrofону naprázdno |
| S_c | dB | celková citlivost mikrofону |
| t_1 | ms | délka n -té půlperrody |
| t_2 | ms | délka $(n+1)$ -té půlperrody |
| t_a | s | časový interval mezi n -tým a $(n+2)$ -tým impulsem |
| t_b | s | časový interval mezi $(n+1)$ -tým a $(n+3)$ -tým impulsem |
| t_k | ms | hodnota kulhání |
| t_n | s | normovaná hodnota perrody |

| | | |
|---------------------------------|---------------------|---|
| $u(t)$ | – | signál (obecně) v časové oblasti |
| $U(\omega)$ | – | obraz signálu v kmitočtové oblasti |
| u_0 | V | výstupní napětí mikrofonu naprázdno |
| u_{ef} | – | efektivní hodnota signálu |
| u_i | – | i -tý prvek z definované množiny u |
| U_{max} | V | nejvyšší možné měřitelné napětí na převodníku |
| U_{min} | V | nejnižší možné měřitelné napětí na převodníku |
| u_{ni} | – | normalizovaný i -tý prvek z množiny u |
| $W(t)$ | – | náhodná funkce |
| $y[k]$ | – | funkce „vibrograf“ |
| $y[k]_{vib}$ | – | omezená funkce „vibrograf“ |
| α | ° | popudný úhel |
| Δ | V | velikost jednoho kvantizačního stupně |
| $\Delta t[k]$ | s | časový přírůstek na současné půlperiodě |
| $\Delta t[k-1]$ | s | časový přírůstek na minulé půlperiodě |
| Δt_n | s | odchylka strojku v poloze n |
| ε | F · m ⁻¹ | permitivita prostředí |
| $\mathcal{F}, \mathcal{F}^{-1}$ | – | dopředná a zpětná Fourierova transformace |

Seznam ilustrací a tabulek

| | | |
|---------|--|----|
| Obr. 1 | Miniaturní akcelerometry firmy OMEGA Engineering [3] | 14 |
| Obr. 2 | Příklad frekvenční charakteristiky pro mikrofon GRAS 46BL 1/4" [6] | 15 |
| Obr. 3 | Příklady směrových charakteristik mikrofonu: a) všesměrová, b) kardioidní, c) superkardioidní, d) hyperkardioidní, e) osmičková, f) pistolová [7] | 15 |
| Obr. 4 | Uhlíkový mikrofon [9] | 16 |
| Obr. 5 | Uhlíková mikrofonní vložka značky Tesla pro telefonní systémy s místní baterií [8] | 17 |
| Obr. 6 | Detail snímáčího členu kondenzátorového mikrofonu [8] | 17 |
| Obr. 7 | Elektretový a back-elektretový mikrofon [7] | 18 |
| Obr. 8 | Membránový elektrodynamický mikrofon [9] | 19 |
| Obr. 9 | Páskový elektrodynamický mikrofon [10] | 19 |
| Obr. 10 | Blokové schéma IIR filtru [14] | 21 |
| Obr. 11 | Kotvový krok [17] | 23 |
| Obr. 12 | Zabudovaný krok [15] | 23 |
| Obr. 13 | Jiné řešení kroku. Setrvačka je zde vybavena regulačními šroubky [17] | 23 |
| Obr. 14 | Časový průběh akustického signálu hodinek | 24 |
| Obr. 15 | Pohyb kroku při prvním úderu [18] | 24 |
| Obr. 16 | Pohyb kroku při druhém úderu [18] | 24 |
| Obr. 17 | Pohyb kroku při třetím úderu [18] | 25 |
| Obr. 18 | Znázornění pohybu setrvačky při vykonání jedné periody a jednoho kyvu [18] | 25 |
| Obr. 19 | Časové intervaly pro výpočet denní odchylky | 26 |
| Obr. 20 | Znázornění asymetrického chodu | 27 |
| Obr. 21 | Určení rozkmitu setrvačky. Zde je znázorněn rozdíl při různě dlouhých intervalech t_1 a t_2 mezi úderu [18] | 27 |
| Obr. 22 | Popudný úhel [18] | 28 |
| Obr. 23 | Blokové schéma analogového časového komparátoru [21] | 30 |
| Obr. 24 | Příklad čelního panelu v prostředí LabVIEW | 33 |
| Obr. 25 | Příklad blokového diagramu v prostředí LabVIEW | 33 |
| Obr. 26 | Měření pomocí kondenzátorového mikrofonu a lékařského fonendoskopu (měřené hodinky leží na sluchátku, hadičkou je zvuk přiveden k dalšímu mikrofonu) | 35 |
| Obr. 27 | Papírová krabice vystlaná tlumicí hmotou | 35 |
| Obr. 28 | Uzavřená krabice s hodinkami a měřicím mikrofonem | 36 |
| Obr. 29 | Časový komparátor Weishi zapojení s měřicí kartou NI myDAQ | 36 |
| Obr. 30 | Měřicí stolička s upnutými hodinkami | 36 |
| Obr. 31 | Hodinky použité pro měření (zleva): Luč automat, Prim kalibr 50 a Hamilton American Classic 37 | 37 |
| Obr. 32 | Frekvenční spektrum hodinek Luč | 37 |
| Obr. 33 | Frekvenční spektrum hodinek Prim | 38 |
| Obr. 34 | Graf naměřeného signálu | 38 |
| Obr. 35 | Amplitudová frekvenční charakteristika vybraného filtru | 39 |
| Obr. 36 | Graf filtrovaného signálu | 39 |
| Obr. 37 | Detail jednoho impulsu po navzorkování signálu | 39 |

| | | |
|---------|--|----|
| Obr. 38 | Porovnání metod pro získání obálky signálu | 40 |
| Obr. 39 | Šum v signálu a jeho hodnota modu (modře) | 41 |
| Obr. 40 | Zašuměný signál..... | 41 |
| Obr. 41 | Signál po odstranění šumu..... | 41 |
| Obr. 42 | Upravený signál bez šumu | 42 |
| Obr. 43 | Rozdělení normalizovaného signálu na dílčí podokna..... | 42 |
| Obr. 44 | Detekce špiček u hodinek Luč..... | 43 |
| Obr. 45 | Detekce špiček u hodinek Prim..... | 43 |
| Obr. 46 | Vibrograf pro hodinky Luč..... | 44 |
| Obr. 47 | Vibrograf pro hodinky Prim | 44 |
| Obr. 48 | Vibrograf pro hodinky Hamilton | 45 |
| Obr. 49 | Srovnání vibrografů pro hodinky Luč..... | 46 |
| Obr. 50 | Srovnání vibrografů pro hodinky Prim..... | 46 |
| Obr. 51 | Srovnání vibrografů pro hodinky Hamilton | 46 |
| Obr. 52 | Ukázka z čelního panelu SW | 46 |
| Obr. 53 | Umělý signál č. 1 o frekvenci 21600 BPH..... | 47 |
| Obr. 54 | Vibrograf signálu č. 1 | 47 |
| Obr. 55 | Umělý signál č. 2 o frekvenci 18000 BPH..... | 48 |
| Obr. 56 | Vibrograf signálu č. 2 | 48 |
| Tab. 1 | Základní polohy hodinek [19] | 26 |
| Tab. 2 | Vady na mechanismu zjistitelné z časového průběhu signálu [18]..... | 28 |
| Tab. 3 | Nejčastější vady v hodinovém mechanismu a jejich projev na vibrografu [19] | 31 |
| Tab. 4 | Porovnání vypočtených hodnot s přístrojem Weishi | 45 |

Úvod

Měření slabých zvukových signálů je problematikou nacházející uplatnění v nejrůznějších oborech lidské činnosti. Lze měřit akustické pozadí v nahrávacích studiích, koncertních sálech nebo akustických komorách. Často je zapotřebí měřit akustickou emisi vydávanou mechanickými nebo elektrickými zařízeními, např. osvětlovací technikou.

Zvláštní postavení má analýza zvuku v klasickém hodinářství. Analýza stavu mechanických hodin je zásadní pro diagnostiku stavu stroje, odhalení závad na mechanismu a jejich nápravu. Tento způsob měření je neinvazivní, jednoduchý a rychlý.

S vývojem časoměrných přístrojů byly zdokonalovány i metody pro ověření jejich přesnosti. V minulosti probíhalo seřízení hodiněk poslechem tikotu a srovnáním s tikotem referenčních hodin. Přesnost takového nastavení byla značně závislá na schopnostech hodináře pečlivě odposlouchat tikání obou strojů. Později se začalo používat stroboskopických světél. Osvětlením setrvačky záblesky o přesně stanovené frekvenci lze doregulovat rychlost kmitání strojku tak, aby se setrvačka jevila nehybná. Tato metoda je poměrně přesná, neposkytuje však žádné další informace o stavu hodinového mechanismu.

Cílem této bakalářské práce je navrhnout praktický přístroj, který nalezne uplatnění jako servisní zařízení.

První kapitola práce je věnována rozboru problematiky měření slabých akustických signálů. Jsou zde popsány nejpoužívanější snímače a technické parametry důležité pro výběr nejvhodnějšího zařízení pro uvedenou aplikaci. Rovněž je zde zmíněn princip převodu spojitého signálu na diskrétní ve vhodném nastavení pro další zpracování.

Druhá kapitola se podrobně věnuje popisu mechanismu hodiněk, zvuku, který jeho činností vzniká a základními vadami, které jsou z časového průběhu akustického signálu zjistitelné. Protože nejpoužívanějším typem hodin jsou náramkové hodinky, zaměřujeme se jen na tento typ strojků.

V praktické části je vysvětleno provedení návrhu virtuálního měřicího přístroje určeného pro měření přesnosti chodu hodinového stroje. Součástí práce je ověření funkce a srovnání s komerčním přístrojem.

1 Problematika měření slabých akustických signálů

Pod pojmem slabý akustický signál se rozumí akustický signál zaznamenávaný v takových podmínkách, kdy je odstup měřeného signálu od okolních ruchů velmi nízký. V mnoha aplikacích cizorodá šumová složka převládá, podstatnou měrou snižuje informační obsah signálu, a proto je nutné volit co nejlépe patřičné způsoby měření tak, aby byl zajištěn na konci měřicího řetězce signál dostatečné kvality vhodný pro další analýzu. Obecně je snímaný signál $u(t)$ v měřicím řetězci možné zapsat takto:

$$u(t) = s(t) + e(t) \quad (1)$$

přičemž $s(t)$ je signál pocházející od měřeného zdroje a $e(t)$ představuje chybový signál. Chybový signál je možné rozdělit na dvě podsložky:

$$e(t) = n_s(t) + n_n(t) \quad (2)$$

kde $n_s(t)$ je stacionární náhodná část signálu a $n_n(t)$ jeho nestacionární náhodná část signálu. Obecně se chybový signál označuje pojmem šum. [1]

Šum je náhodný výkonový signál (též náhodný proces), který lze popsat náhodnou funkcí $W(t)$. Lze jej popsat i statistickými charakteristikami, jako např. spektrální hustota, korelační funkce a jiné. Bez znalostí těchto charakteristik šum nelze ze signálu odstranit.

Jeden z důležitých parametrů pro znalost kvality snímaného signálu je poměr výkonu signálu k výkonu šumu (angl. Signal to Noise Ratio – SNR). Lze jej vypočítat jako poměr výkonů P signálu a N šumu nebo poměr jejich efektivních hodnot:

$$\left(\frac{P}{P_N}\right)_{dB} = 10 \cdot \log \frac{P}{P_N} = 20 \cdot \log \frac{u_{ef}}{n_{ef}} \quad (3)$$

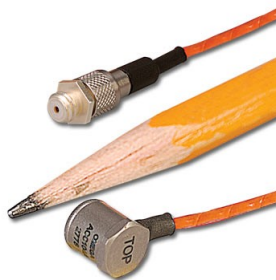
kde u_{ef} je efektivní hodnota měřeného signálu a n_{ef} je efektivní hodnota šumu. SNR se vyjadřuje v decibelech. [2]

1.1 Snímače akustických signálů

1.1.1 Kontaktní měření

V tomto případě je snímač bezprostředně spojen se zdrojem zvuku dotykem či vhodným zvukovodným médiem, nejčastěji pevnou látkou, která maximalizuje přenos vibrací do snímače. Výhodou je minimalizace vlivu okolních zvuků na snímač; kmity jsou snímány v dostatečně velké amplitudě vzhledem k okolním zvukům.

Kontaktně lze měřit například pomocí jednoosých akcelerometrů, které jsou primárně určeny k měření vibrací např. ložisek v točivých strojích.



Obr. 1 Miniaturní akcelerometry firmy OMEGA Engineering [3]

Nevýhodou je ale poměrně nízký kmitočtový rozsah akcelerometrů (1–10 000 Hz) vzhledem k povaze měření v této práci. Proto se akcelerometry dále zabývat nebudeme.

1.1.2 Bezkontaktní měření

U tohoto typu měření je mezi měřeným objektem a snímačem vzduchová mezera. V tomto případě snímač – zde mikrofon – přijímá spolu s žádaným signálem i rušivé zvuky okolí. Proto je snahou vliv okolních ruchů minimalizovat umístěním mikrofonu co nejbližší zdroji zvuku a dále jej odstraňovat pomocí matematických metod (viz níže).

1.2 Přehled nejdůležitějších vlastností mikrofonů

Mechanická velikost mikrofonu charakterizuje vnější průměr pouzdra mikrofonu. Tato vlastnost souvisí s ostatními charakteristikami přístroje. Standardizované rozměry se uvádějí v palcích, v praxi se používají nejčastěji rozměry 1', ½' a ¼'. Volba správné velikosti je podmíněna frekvencí snímaného zvuku. Menší mikrofony jsou méně citlivé, mají membránu malých rozměrů a jsou vhodné pro měření signálů o vyšších frekvencích. Mikrofony o větším průměru disponují vyšší citlivostí a jsou vhodné pro měření slabších zvuků i v pásmu nízkých frekvencí. Velikostí mikrofonu je dán i horní mezní kmitočet, který je pro daný přístroj ještě měřitelný.

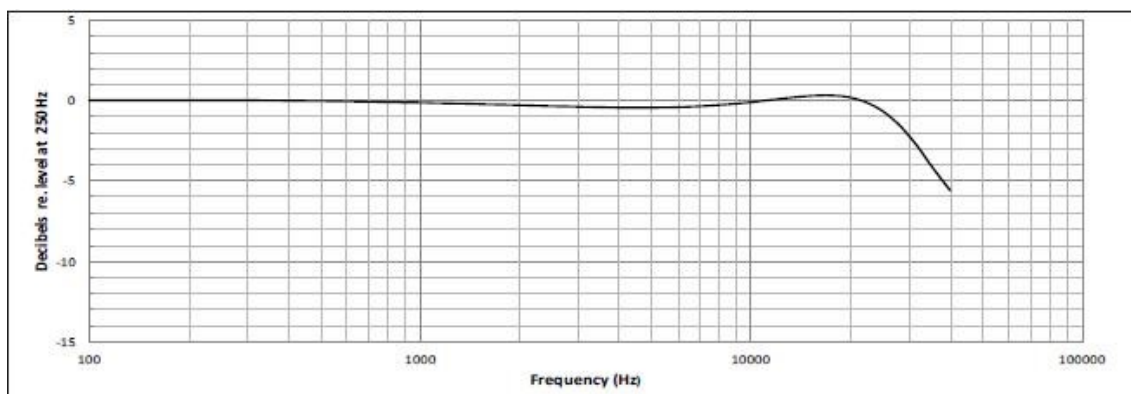
Citlivost mikrofonu je úměra mezi měřeným akustickým tlakem a velikostí napětí na výstupu mikrofonu. Tato veličina se udává ve stavu naprázdno, tedy bez zatížení mikrofonu zesilovacím stupněm. Je platná pro měření v poli volném, difúzním i pro tlaková měření nejčastěji pro kmitočet 102,4 Hz dle normy ČSN ISO 266 [4] (při teplotě okolí 23 °C a rel. vlhkosti 50 %). Jednotkou je V·Pa⁻¹ nebo decibel k této jednotce vztažený. Připojením zesilovače dojde ke změně citlivosti mikrofonu dle vzorce:

$$S_c = S_0 + G \quad (4)$$

kde S_c (dB) je celková citlivost mikrofonu s předzesilovačem, S_0 (dB) je citlivost mikrofonu naprázdno a G (dB) je napěťové zesílení kombinace mikrofonu a předzesilovače. [5]

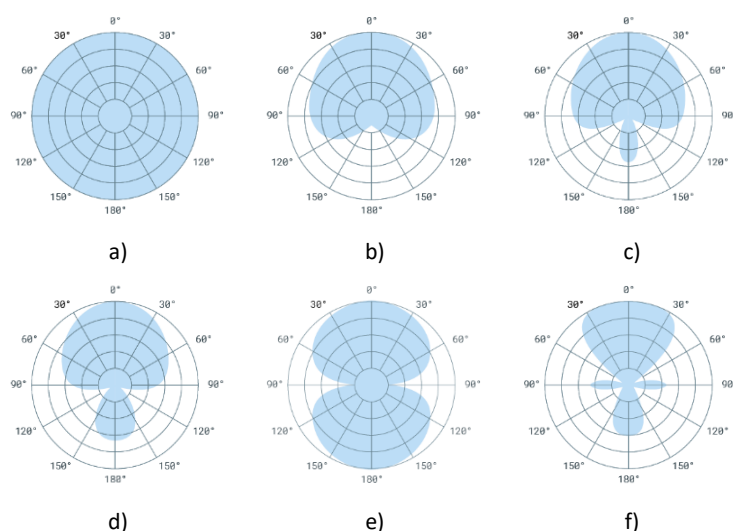
Frekvenční charakteristika je závislost citlivosti mikrofonu na kmitočtu snímaného signálu při neměnném akustickém tlaku. Dolní mez je určena poklesem měřeného signálu o -3 dB. Horní mezní frekvence odpovídá hladině -2 dB pod referenční úrovní 0 dB. Rezonanční frekvence membrány může ovlivňovat měření, proto je snahou konstruktérů přenést ji mimo měřitelný rozsah mikrofonu.

Konstrukce také dbá na to, aby frekvenční charakteristika mikrofonů byla pokud možno v co největším rozsahu konstantní (Obr. 2). Norma stanovuje maximální odchylku frekvenční odezvy na 2 dB. Při frekvencích nad 1000 Hz se projevují vlivy odrazů zvukových vln od kapsle mikrofonu, což má nežádoucí účinek na tvar frekvenční charakteristiky. Prakticky se používá jejich eliminace v podobě tlumení kmitů uvnitř pouzdra přístroje.



Obr. 2 Příklad frekvenční charakteristiky pro mikrofon GRAS 46BL 1/4" [6]

Směrová charakteristika mikrofonu je závislost citlivosti snímače na směru, odkud na něj zvukový signál přichází. Nebývá pro celý frekvenční rozsah mikrofonu stejná, ale je obvykle udávána pro několik frekvenčních pásem. Zakresluje se do polárního grafu jako křivka pro sílu signálu 0 dB v závislosti na snímaném úhlu. Některé typy mikrofonů umožňují nastavit několik směrových charakteristik dle povahy měření.



Obr. 3 Příklad směrových charakteristik mikrofonu: a) všesměrová, b) kardioidní, c) superkardioidní, d) hyperkardioidní, e) osmičková, f) pistolová [7]

Pod pojmem **dynamický rozsah** mikrofonu se rozumí interval mezi nejmenším a největším možným měřitelným akustickým tlakem, který je mikrofon schopen do jisté míry věrohodně zachytit. Spodní mez tohoto rozsahu je omezena tzv. šumem mikrofonu. Vlastní šum mikrofonu, také nazývaný jako *tepelný šum*, je způsoben nárazem molekul látky měřeného prostředí na membránu. Tento jev,

který zanáší do měření náhodný signál v řádu mikrovoltů, nelze úplně odstranit ani v bezodrazovém prostředí, zdrojem je přirozený tepelný pohyb částic. Velikost tohoto šumu udává hodnotu nejmenšího možného měřitelného akustického tlaku. Při známé citlivosti mikrofonu bude tato hodnota rovna:

$$p_a = \frac{u_0}{S_0} \quad (5)$$

kde u_0 je výstupní napětí mikrofonu (V), S_0 citlivost mikrofonu naprázdno ($V \cdot Pa^{-1}$), p_0 vzažná hodnota akustického tlaku (Pa) a p_a minimální hodnota akustického tlaku (Pa). Měřitelný akustický výkon L_{ak} je pak roven:

$$L_{ak} = 20 \cdot \log \left(\frac{p_a}{p_0} \right) \quad (6)$$

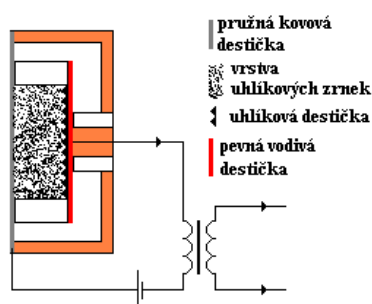
Dalším zdrojem šumu je předzesilovač. Nejvyšší možná měřitelná hladina akustického tlaku je dána konstrukčními parametry mikrofonu a předzesilovače, v oblasti blízké maximu měřitelného rozsahu ale dochází k poměrně značnému zkreslení signálu vlivem velké výchylky membrány. Za horní mez se obecně považuje frekvence, při níž je hodnota zkreslení (*THD* – Tonal Harmonic Distortion) rovna 3 %.

Dále může výrobce mikrofonu udávat rozsah provozních teplot přístroje, relativní vlhkost vhodnou pro měření, možnost použití v agresivním prostředí a podobně. [5]

1.3 Typy mikrofonů

Uhlíkový mikrofon

Tvoří jej komůrka, na jejíž jedné straně je membrána. Uvnitř komůrky je uhlíkový prášek. Budicí stejnosměrný proud prochází membránou a práškem k druhé elektrodě. Stlačováním a uvolňováním zrněk kmitající membránou dochází ke změně přechodového odporu mezi nimi. Procházející stejnosměrný proud je tak modulován změnou odporu uhlíkové náplně. Uhlíkové mikrofony jsou levné a nenáročné na provoz. Kmitočtový je však poměrně omezený (200–3400 Hz). Tyto mikrofony jsou značně citlivé na otřesy, které způsobují přesypávání zrněk v komůrce, a tím značný šum v signálu. Dříve byly uhlíkové mikrofony hojně rozšířeny v telefonii, ale pro velké zkreslení a nestabilní přenosové vlastnosti se dnes běžně nepoužívají. Jejich jednoduchá robustní konstrukce, schopnost přenášet velké výkony při malých napětích a odolnost vůči průrazům však předurčuje použití těchto mikrofonů v dorozumívacích systémech určených pro výbušná prostředí či jiné extrémní podmínky. [8]



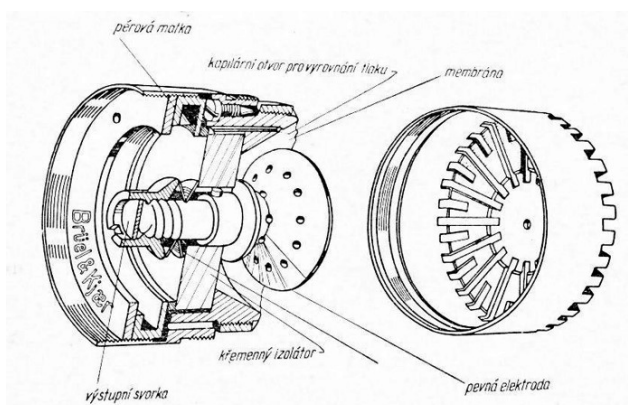
Obr. 4 Uhlíkový mikrofon [9]



Obr. 5 Uhlíková mikrofonní vložka značky Tesla pro telefonní systémy s místní baterií [8]

Elektrostatický mikrofon

Také nazývaný jako kondenzátorový nebo kapacitní je nejpoužívanějším typem mikrofonu v technice akustických snímání a měření. Vyniká velkým frekvenčním rozsahem a věrnou reprodukcí zvuků. Samotné snímací ústrojí je tvořeno malým vzduchovým kondenzátorem. Zvukové vlny rozkmitávají pohyblivou membránu, která tvoří jednu, přední desku kondenzátoru, uzavírající měřicí dutinku v těle mikrofonu. Druhou elektrodou je perforovaný plíšek, který rozděluje dutinku za membránou na dvě části. Otvory v plíšku omezují vliv akustické impedance vzduchové mezery. Dutinka za pevnou elektrodou je propojena s okolím kapilárou, která vyrovnává tlak vzduchu mezi dutinkou a okolním prostředím.



Obr. 6 Detail snímacího členu kondenzátorového mikrofonu [8]

Změnou vzdálenosti mezi deskami se mění i kapacita kondenzátoru. V nečinnosti je vzdálenost mezi elektrodami asi 10 μm . Kapacita mikrofonu C_0 je v klidu dána vztahem:

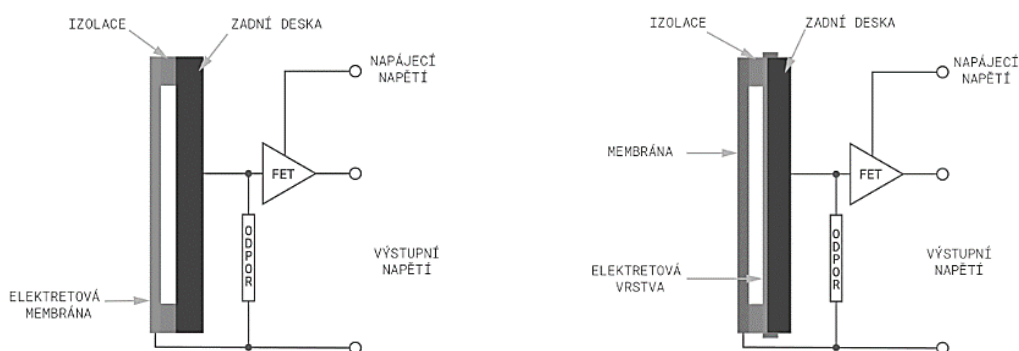
$$C_0 = \frac{\varepsilon S}{d} \quad (7)$$

kde ε je permitivita prostředí, S plocha desek a d je vzdálenost mezi nimi.

Elektrostatické mikrofony je nutné při měření budit polarizačním napětím z externího zdroje. Stejnosměrné polarizační napětí bývá dle konstrukce 30 až 200 V. Externí zdroj zároveň napájí předzesilovač. Poměrně malé změny kapacity (a tudíž i napětí) jsou zesíleny vysokoimpedančním předzesilovacím stupněm, který je obvykle instalován v šasi mikrofonu.

Předpolarizovaný elektrostatický mikrofon

nebo též *elektretový mikrofon* pracuje na podobném principu jako mikrofon kondenzátorový. Elektretový mikrofon nevyžaduje externí buzení, potřebné budicí napětí obstarává látka zvaná *elektret*¹. Ten v začátcích vývoje tohoto typu mikrofonu tvořil celou snímací membránu, jejíž velká hmotnost je však omezujícím parametrem zejména v pásmu vysokých frekvencí. Postupem času byl vyvinut tzv. *back-elektretový mikrofon*, kde je elektretem potažena pouze zadní deska kondenzátoru (Obr. 7). Tím se elektretové mikrofony svými vlastnostmi přiblížily mikrofonom kapacitním. Díky nevelkým nárokům na výrobu a poměrně kvalitnímu přenosu nachází tento typ mikrofonů obrovské uplatnění ve spotřební elektronice (počítače, telefony apod.).



Obr. 7 Elektretový a back-elektretový mikrofon [7]

Back-elektretovou technologii nalezneme i u tzv. kontaktních mikrofonů, které jsou určeny pro snímání lidského hlasu i zvuku hudebních nástrojů, kde efektivně potlačují zpětnou vazbu.

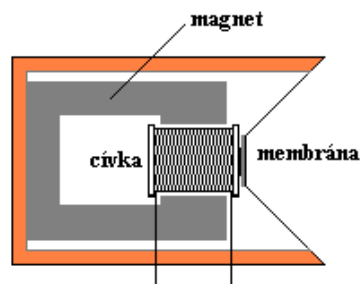
Krystalový (piezoelektrický) mikrofon

Tento typ je založen na piezoelektrickém jevu, což je schopnost některých látek vytvářet při mechanickém namáhání elektrický náboj (existuje i opačný jev, vzhledem k povaze práce se jím však nebudeme zabývat). Konstrukcí je to plechová membrána, na jejíž zadní straně je přilepena tenká vrstva piezoelektrické látky, na niž přiléhá druhá elektroda. Odpor piezoelektrického mikrofonu je v řádech megaohmů. Citlivost je u tohoto typu zhruba $1\text{--}3 \text{ mV}\cdot\text{Pa}^{-1}$.

Elektrodynamický mikrofon

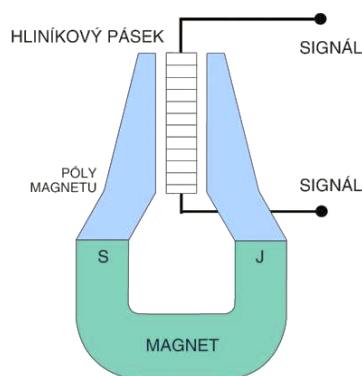
dosahuje nízkého šumu a malého zkreslení. Rozlišujeme typ membránový a páskový. Kvalitní mikrofony snímají signál v rozsahu 30 Hz–15 kHz. U membránového typu přenáší pružná membrána kmity na volně loženou cívku (kmitačku) v poli permanentního magnetu. Dnes se užívá neodymových magnetů pro jejich příznivé vlastnosti.

¹ Látka schopná permanentně udržet elektrický náboj, analogie permanentního magnetu.



Obr. 8 Membránový elektrodynamický mikrofon [9]

Páskový elektrodynamický mikrofon obsahuje místo cívky a membrány pružný pásek, nejčastěji z hliníkové folie, umístěný mezi póly permanentního magnetu. Pohybem pásku dochází k indukovaní napětí, které je úměrné amplitudě kmitů snímaného zvuku.



Obr. 9 Páskový elektrodynamický mikrofon [10]

Elektromagnetický mikrofon

Tento typ mikrofonu má snímací cívku nepohyblivou. S membránou je spojena pouze chvějka, která svým pohybem mění magnetický tok procházející cívkou a indukuje v ní elektrický signál. Tyto mikrofony mají velmi omezený kmitočtový rozsah (30–3400 Hz) a proto se hodí jen k přenosu řeči a v oblastech, kde nejsou kladeny vysoké požadavky na kvalitu přenosu. [5], [7], [11]

1.4 Úprava signálu v měřicím řetězci

1.4.1 Převod analogového zvukového signálu na diskrétní

Vzorkování signálu

Proces vzorkování je převod spojitého (analogového) signálu na diskrétní v časové oblasti. Získaný signál je tak definován pouze v diskrétních okamžicích (vzorcích), které jsou od sebe konstantně vzdáleny o časový interval dt . Jeho převrácená hodnota pak tvoří vzorkovací frekvenci f_{vz} :

$$f_{vz} = \frac{1}{dt} \quad (8)$$

Čím je vzorkovací frekvence vyšší, tím více se bude podobat diskretizovaný signál původnímu analogovému. Počet vzorků je však vždy konečný. Z toho vyplývá, že analogově-digitální převod je prováděn určitou ztrátou informace. Proto je snahou pracovat s co nejvyšší vzorkovací frekvencí (resp. danou možnostmi použité technologie). Minimální vzorkovací frekvence, kterou lze signál korektně navzorkovat, je stanovena *Shannon-Kotělnikovým teorémem*:

„Přesná rekonstrukce spojitého, frekvenčně omezeného signálu z jeho vzorků je možná jenom tehdy, pokud byl vzorkován frekvencí alespoň dvakrát vyšší, než je maximální frekvence rekonstruovaného signálu.“

To znamená, že mezi vzorkovací frekvencí f_{vz} a nejvyšší žádoucí frekvencí v signálu f_{max} platí vztah

$$f_{vz} > 2 \cdot f_{max} \quad (9)$$

Při nedodržení této podmínky dojde k jevu zvanému *aliasing*. Dvojnásobná vzorkovací frekvence ale zajistí pouze korektní periodu a amplitudu navzorkovaného v signálu. Pro zachování tvaru signálu proto je volena vzorkovací frekvenci zhruba 5–10krát vyšší. [12]

Kvantování signálu

Proces kvantování je převedení jednotlivých vzorků na číslicový signál s konečným počtem možných diskrétních hodnot. Tento počet je dán tzv. *šířkou slova n* . Ta udává, kolika napěťových hladin může signál nabývat. Počet možných hodnot N v rozsahu převodníku je:

$$N = 2^n \quad (10)$$

Např. A/D převodník se šířkou slova 16 bitů bude mít $2^{16} = 65\,536$ napěťových hladin. Velikost jednoho kvantizačního stupně Δ (V) (LSB^2) pak je rovna:

$$\Delta = \frac{U_{max} - U_{min}}{N} \quad (11)$$

kde U_{max} (V) je nejvyšší měřitelné napětí na převodníku a U_{min} (V) nejnižší měřitelné napětí na převodníku. Při rozsahu převodníku -5 až $+5$ V to bude rozlišení zhruba 0,153 mV. V praxi je pro měřicí karty nejčastější převodník se šířkou slova 16 bitů. [12]

² angl. *Least significant bit* = nejméně významný bit.

1.4.2 Spektrální analýza

Neznámý signál $u(t)$ je možné rozložit na součet dílčích harmonických signálů (typu sinus nebo kosinus³):

$$u(t) = \sum_{i=1}^{\infty} u_{m,i} \cdot \cos(\omega_i t + \varphi_i) \quad (12)$$

Znalostí těchto dílčích signálů lze sestavit tzv. *spektrum signálu*. Pro převod signálu z oblasti časové do oblasti kmitočtové je aplikována Fourierova transformace:

$$U(\omega) = \mathcal{F}[u(t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} u(t) e^{-j\omega t} dt \quad (13)$$

Zpětnou Fourierovou transformací lze pak rekonstruovat ze spektra původní signál:

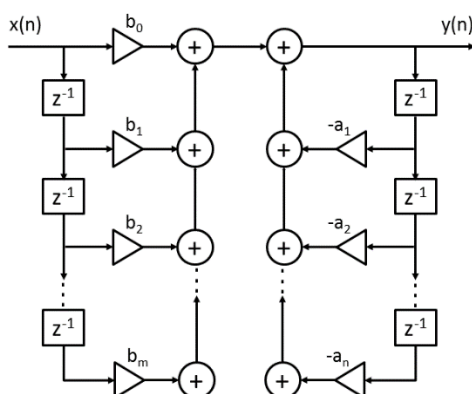
$$u(t) = \mathcal{F}^{-1}[U(\omega)] = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} U(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (14)$$

Fourierův obraz $U(\omega)$ originálu $u(t)$ tvoří tzv. *dvoustranné Fourierovo komplexní spektrum*.

V praktické části práce je provedena spektrální analýza signálu z *jednostranného* Fourierova spektra, které je definováno na intervalu hodnot $<0; +\infty$). [13]

1.4.3 Digitální filtrace

Digitální filtry představují v diskrétní časové oblasti ekvivalent filtrů analogových. Jsou to matematické algoritmy, z čehož plynou oproti analogovým filtrům výhody snadné nastavitelnosti a implementovatelnosti. Digitální filtry jsou časově stálé a nevyskytují se u nich toleranční rozptyly. Jejich nevýhodou je omezená šířka pásma a potřeba výpočetního výkonu procesoru.



Obr. 10 Blokové schéma IIR filtru [14]

³ V teorii signálů se používají kosinusové signály, protože po průchodu lineárními elektrickými obvody nemění svou frekvenci a zůstávají kosinusovými. [13]

Zástupcem digitálních filtrů je **IIR filtr** (Infinite Impulse Response), což je filtr s nekonečnou odezvou impulsní charakteristiky. Tento filtr lze (na rozdíl od filtru FIR) zkonstruovat i jako analogový. IIR filtr je v porovnání s filtrem FIR méně náročný na výpočetní výkon, má však nelineární fázové spektrum. Jeho rovnice je:

$$\sum_{i=0}^M a_i y[n-i] = \sum_{k=0}^M b_k x[n-k] \quad (15)$$

kde $y[n]$ je výstupní signál z filtru, $x[n-k]$ vstupní signál, M řád čitatele, N řád jmenovatele, a_i soubor reverzních koeficientů a b_k soubor přímých koeficientů.

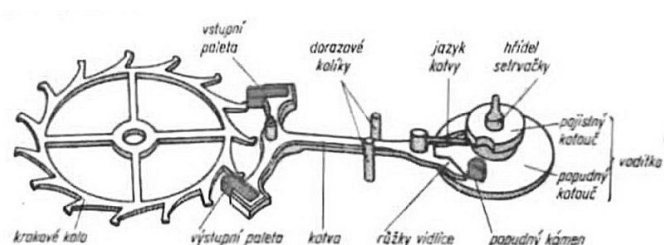
V návrhu virtuálního přístroje byl použit IIR filtr typu Butterworth, jehož frekvenční charakteristika je bez výrazného zvlnění v propustném pásmu. [12]

2 Teoretický rozbor problematiky akustických projevů mechanických hodin

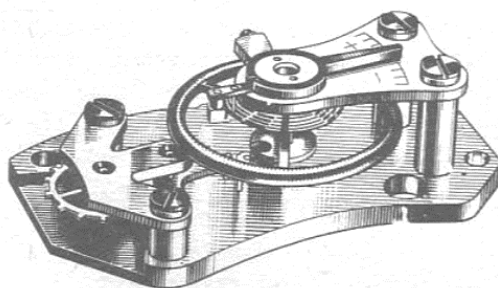
Zdrojem akustického signálu v mechanických hodinách je oscilátor (regulátor chodu) a krok, který kmity oscilátoru počítá. Krok v pravidelných časových intervalech zahrazuje soukolí mechanismu a pohání oscilátor. Protože v náramkových hodinkách, které jsou nejpočetnější skupinou hodinových strojů vůbec, se nejčastěji používá kotvový krok, práce se zaměřuje jen na tento nepoužívanější typ. [15]

2.1 Kotvový krok

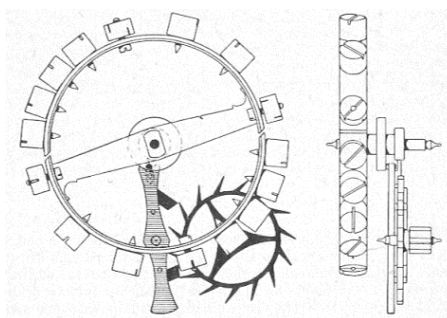
Také zřídka nazývaný jako „švýcarský krok“ [16] je nepoužívanějším regulátorem chodu v mechanických náramkových hodinkách.



Obr. 11 Kotvový krok [17]



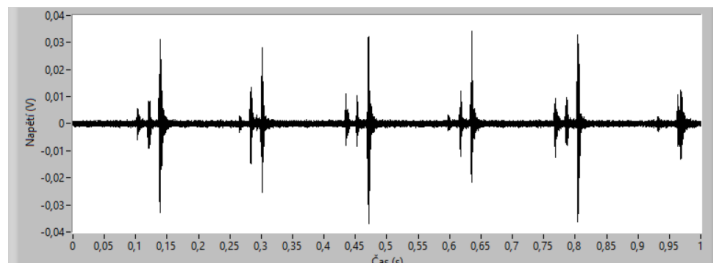
Obr. 12 Zabudovaný krok [15]



Obr. 13 Jiné řešení kroku. Setrvačka je zde vybavena regulačními šroubky [17]

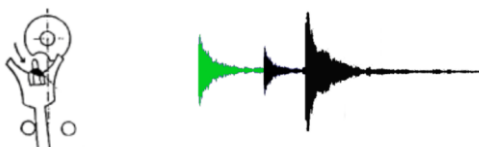
2.2 Akustický signál hodinek

Krok vytváří svou činností pravidelné zvukové impulsy, slyšitelné jako tikání. Tyto impulsy jsou způsobeny vzájemnými dotyky součástí kroku. Tvar signálu je do jisté míry ovlivněn konstrukcí mechanismu a jeho stavem, ve většině případů ale mají signály shodné základní rysy (Obr. 14).



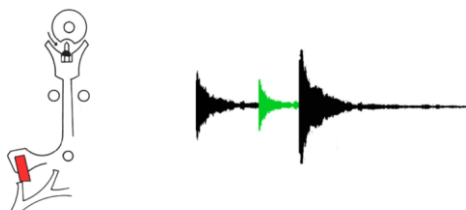
Obr. 14 Časový průběh akustického signálu hodinek

Každý zvukový impuls se skládá ze tří po sobě jdoucích úderů. První úder vytváří náraz popudného kamene do vidličky při tzv. vypuštění kroku (výběhu) (Obr. 15),



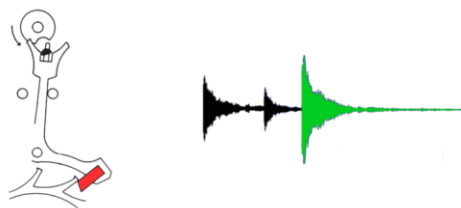
Obr. 15 Pohyb kroku při prvním úderu [18]

druhý úder vzniká nárazem zubu krokového kola na vstupní paletu kotvy a nárazem vidličky na popudný kámen (Obr. 16).



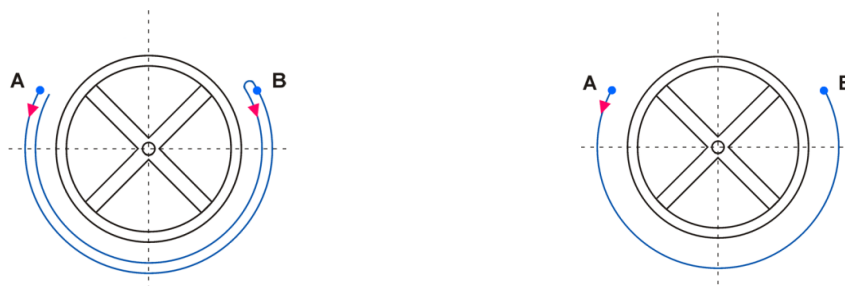
Obr. 16 Pohyb kroku při druhém úderu [18]

Třetí, nejsilnější úder, je způsoben nárazem zubu krokového kola na výstupní paletu kotvy a nárazem vidličky na dorazový kolík (Obr. 17). [19]



Obr. 17 Pohyb kroku při třetím úderu [18]

Každý impuls náleží pohybu setrvačky z jedné krajní polohy do druhé, tedy jedné půlperiodě kyvu (Obr. 18), což znamená, že jedné periodě setrvačky náleží dva průchody rovnovážnou polohou, a tedy i dva impulsy.



Obr. 18 Znáznornění pohybu setrvačky při vykonání jedné periody a jednoho kyvu [18]

Frekvence impulsů je dána konstrukcí hodinového mechanismu. V hodinářské praxi se užívá pro vyjádření frekvence oscilace setrvačky počet kyvů za hodinu (angl. *beat per hour* – BPH). Méně často se setkáme s frekvencí F udávanou v hertzech. Mezi frekvencí F a počtem kyvů za hodinu N platí následující vztah [20]:

$$F = \frac{N}{2 \cdot 3600} \quad (16)$$

Budíky a kuchyňské minutky kmitají obvykle na 2 Hz (14400 BPH). Strojky do náramkových hodinek byly dříve konstruovány na 2,5 Hz (18000 BPH), běžné dnešní náramkové hodinky nejčastěji pracují s kmitočty 21600 BPH (3 Hz), 28800 BPH (4 Hz) a vzácně i 36000 BPH (5 Hz). Vyšší frekvence oscilátoru dodává strojku větší přesnost a stabilitu vůči vnějším pohybům, konstrukce takového mechanismu je však dražší a složitější.

2.3 Základní diagnostika stavu hodinového stroje

Měření chodu náramkových hodinek se standardně provádí v šesti polohách. V praxi se používá smluvené označení jednotlivých poloh, viz Tab. 1:

| Tab. 1 Základní polohy hodinek [19] | |
|-------------------------------------|-----------------|
| Poloha hodinek | Označení polohy |
| číselníkem nahoru | ČN |
| číselníkem dolů | ČD |
| korunkou nahoru | KN |
| korunkou dolů | KD |
| korunkou vlevo (číselníkem vpřed) | KL |
| korunkou vpravo (číselníkem vpřed) | KP |

Odchylka Δt_n se udává pro každou polohu zvlášť a k těmto hodnotám se uvádí algebraický průměr ze změřených n hodnot:

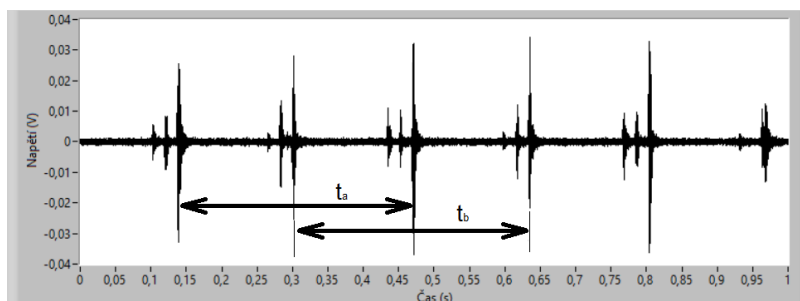
$$\Delta t = \frac{\sum_{n=1}^n (\Delta t_n)}{n} \quad (17)$$

Pro rychlé zjištění okamžitého denního chodu postačí měřit jen ve třech polohách: ČN, KD a k nim zvolit libovolnou polohu: KL, KP ČD. [19]

Mezi základní hodnoty, podle nichž je posuzován stav hodinového mechanismu, patří: *denní odchylka chodu, asymetrický chod a amplituda setrvačky*.

2.3.1 Denní odchylka chodu

Předcházení či zpoždování je způsobeno rychlejším či pomalejším chodem kroku.



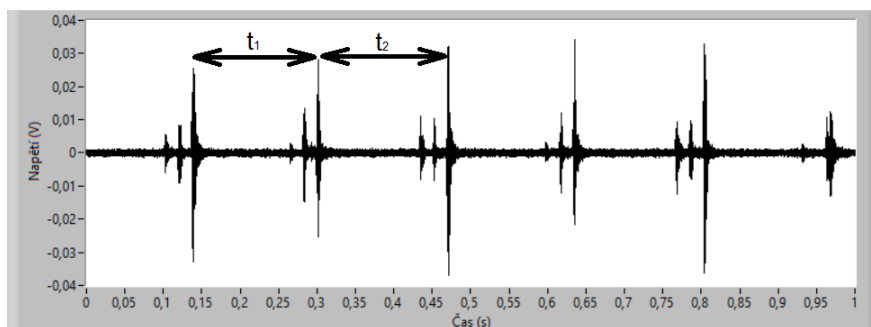
Obr. 19 Časové intervaly pro výpočet denní odchylky

Výsledkem aritmetického průměru časového intervalu t_a mezi n -tým a $(n+2)$ -tým impulsem a t_b mezi $(n+1)$ -tým a $(n+3)$ -tým impulsem je normovaná hodnota periody t_n [18]:

$$t_n = \frac{t_a + t_b}{2} \quad (18)$$

Odečtením od žádané (referenční) periody hodinek vznikne odchylka, kterou je nutno přepočítat na počet sekund za den (24 hodin). Kladná hodnota (+) znamená, že se hodinky opozdily, záporná hodnota (–) značí, že hodinky jdou rychleji oproti normálu. Velikosti předcházení či zpoždování odpovídá na „vibrografu“ šikmost vykreslené čáry (viz Tab. 3).

2.3.2 Asymetrický chod (kulhání)



Obr. 20 Znáznornění asymetrického chodu

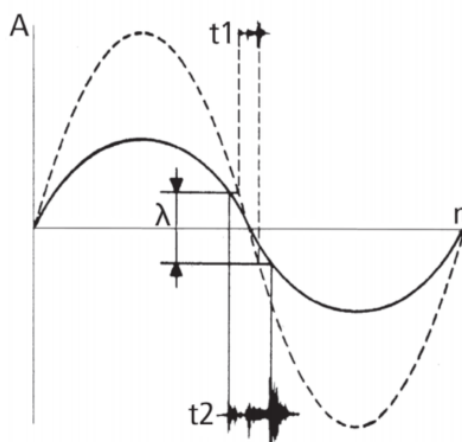
V tomto případě jsou kyvy (půlperiody) setrvačky nestejně dlouhé. Kulhání t_k se udává v milisekundách jako průměrný rozdíl na půlperiodu [18]:

$$t_k = \frac{t_1 - t_2}{2} \quad (19)$$

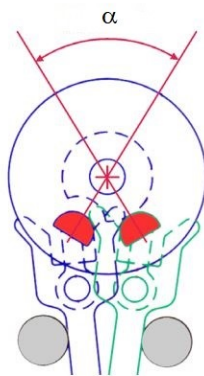
Na grafickém zobrazení (vibrograf) je asymetrický chod zobrazen jako dvě rovnoběžné čáry (viz Tab. 3). Čím jsou od sebe čáry dále, tím je hodnota kulhání vyšší.

2.3.3 Rozkmit setrvačky

Rozkmit nebo také amplituda setrvačky je důležitým parametrem při posuzování stavu hodinového stroje. Jedná se o úhlovou dráhu, kterou setrvačka opisuje při svém pohybu mezi dvěma krajními polohami. Měřením zjišťujeme poměrnou velikost časového intervalu mezi dotečky popudného kamene s vidlicí kotvy, tedy mezi prvním a třetím úderem z jednoho impulsu (Obr. 21). Čím je amplituda setrvačky větší, tím je větší i rychlost, kterou setrvačka prokmitává okolo rovnovážné polohy a tím kratší je i měřený interval λ .



Obr. 21 Určení rozkmitu setrvačky. Zde je znázorněn rozdíl při různě dlouhých intervalech t_1 a t_2 mezi údery [18]



Obr. 22 Popudný úhel [18]




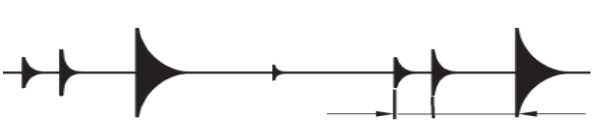
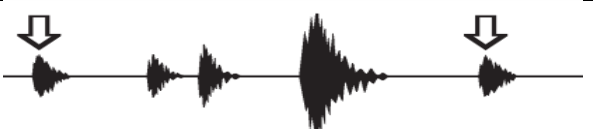
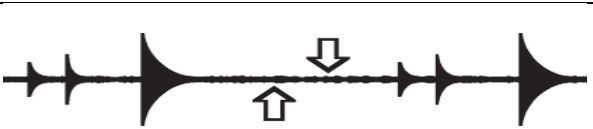

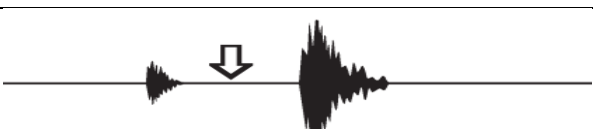
Pro výpočet amplitudy je nutné znát popudný úhel α (°). Je to úhel styku popudného kamene s vidličkou (Obr. 22). Popudný úhel je dán konstrukcí mechanismu a nelze jej ze zvukového obrazu hodinek určit. Jeho nejběžnější hodnota pro náramkové hodinky bývá okolo 51 °. Amplituda B rozkmitu setrvačky je poté rovna:

$$B = \frac{3600 \cdot \alpha}{t_p \cdot \pi \cdot N} \quad (20)$$

kde t_p (s) je čas mezi dvěma údery popudného kamene (prvním a třetím) a N je počet kyvů strojku za hodinu. Amplituda setrvačky časem pozvolně klesá se stárnutím maziv v mechanismu. [18]

Z časového průběhu akustického signálu lze zjistit nejčastější závady hodinek, viz Tab. 2:

| Tab. 2 Vady na mechanismu zjistitelné z časového průběhu signálu [18] | |
|---|---|
| Časový průběh | Vada |
| | malá vůle mezi paletou a setrvačkou |
| | příliš velká vůle mezi paletou a setrvačkou |
| | příliš silný výběh |
| | tření v mechanismu (např. vidlička-setrvačka nebo paleta-zuby krokového kola) |

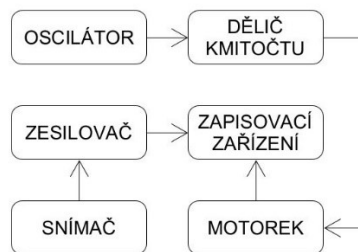
| | |
|---|---|
|  | jazyk vidličky dře o pojistný kotouč |
|  | nedostatečná vůle mezi popudným kamenem a růžky vidlice |
|  | malá amplituda |
|  | příliš velká vůle v ložiskách setrvačky |
|  | růžky vidlice narážejí do popudného kamene |
|  | drsňý čep (dře o ložisko) |
|  | dření vlásku |
|  | paleta kotvy dopadá přímo na plochu zubu |

2.3.4 Zobrazení „vibrografu“

Název „vibrograf“⁴ je nepřesným označením pro výstup (původně) z analogového časového komparátoru.

Základem časového komparátoru je přesně vyladěný oscilátor, jehož kmitočet je srovnáván s akustickým signálem z hodinek. První vyráběné modely komparátorů zaznamenávaly rozdíl mezi snímaným a referenčním signálem v podobě řady bodů na procházející proužek papíru. Šlo o elektromechanické zapisovací zařízení fungující na principu tištění podobnému psacímu stroji. [15]

⁴ Označení „vibrograf“ se vžilo také pro časové komparátory vůbec. Původně to byl obchodní název tohoto zařízení, vyráběného švýcarskou firmou *Reno S.A.*



Obr. 23 Blokové schéma analogového časového komparátoru [21]

Ačkoliv dnešní přístroje používají digitální techniky pro měření i zobrazování, grafický výstup v podobě řady bodů se používá dodnes jako orientační prostředek pro svou přehlednost a spolehlivost. Dnes se grafický výstup přístroje ještě doplňuje přesnými číselnými údaji.

Funkci zobrazení vibrografu je možné popsat jako diskretní funkci $y[k]$ součtu současného $\Delta t[k]$ a minulého $\Delta t[k-1]$ časového přírůstku na půlperiodě:

$$y[k] = \Delta t[k] + \Delta t[k - 1] \quad (21)$$

Výsledkem funkce je řada bodů, která je zakreslena do kartézského souřadného systému. Pro větší podobnost s pruhem papíru je možné funkci omezit v amplitudě podle následujícího vzorce:

$$y[k]_{vib} = ((y[k] + r) \div r) \cdot 2r - y[k] \quad (22)$$

kde $y[k]_{vib}$ je omezená funkce vibrografu a r požadovaný rozsah vibrografu. Znak \div značí celočíselné dělení. Z tvaru výsledné křivky lze odečíst míru zpoždění či předcházení, ale také vady v mechanismu, viz Tab. 3. Přesně jdoucím mechanismu odpovídá vodorovná čára (případně zdvojená).

| Tab. 3 Nejčastější vady v hodinovém mechanismu a jejich projev na vibrografu [19] | |
|---|--------------------------|
| Vada mechanismu | Graf z výstupu přístroje |
| Přesný chod hodinek | |
| Předcházení | |
| Zpoždování | |
| Asymetrická funkce kroku (kulhání) – nestejná doba polokyvů se projevuje větší vzdáleností stop od sebe | |
| Vadný zub krokového kola | |
| Narážení sertvačky na kotvu z druhé strany vlivem příliš velké amplitudy | |
| Vadná paleta kotvy – jedna stopa je nepravidelná | |
| Obvodová házivost krokového kola – pravidelné vlnovky | |
| Nepravidelná amplituda setrvačky (znečištěná ložiska) | |
| Znečištění kroku nebo chybný přenos hnací síly, také nadměrné vůle v ložiskách | |
| Nevyvážená setrvačka – zlom stopy po změně polohy hodinek | |
| Poruchy isochronismu – po změně polohy hodinek mění stopy svou vzdálenost | |
| Vadný přenos hnací síly. Dle velikosti periody vlnovek je možno přesněji určit původ vady. | |

3 Popis vývojových prostředí pro tvorbu měřicích systémů

Moderní vývojová prostředí představují v oblasti měřicích systémů nové možnosti související s průnikem informačních technologií 21. století do nejrůznějších oblastí lidské činnosti. Digitální technologie celý měřicí proces značně zrychlují, zefektivňují a zjednodušují. Zatímco klasické analogové měřicí přístroje jsou svou funkcí jednoznačně určeny pouze pro úzce specializované aplikace (např. voltmetrem lze měřit pouze elektrické napětí), moderní měřicí systém nabízí zpracování a analýzu dat ihned po naměření ve vývojovém software.

Údaj z klasického přístroje je nutné odečíst a pro další zpracování přepsat, čímž vzniká riziko zanesení chyby do měření, což u moderních systémů odpadá. Snaha vyloučit chybu lidského faktoru vedla k zavedení přístrojů vybavených komunikačním rozhraním. Naměřená data jsou odesílána z měřicího přístroje do počítače k dalšímu vyhodnocení. Tím se celý měřicí řetězec značně zefektivní a zautomatizuje. Počítač zvládne zpracovat velké množství dat, a tím je měření ještě více zpřesněno. Dosud zdoluhavé přepisování hodnot z klasických měřicích přístrojů nahradilo strojové zpracování dat, s nimiž může uživatel v prostředí měřicího software libovolně pracovat.

Funkce měřicího přístroje lze naprogramovat přímo v počítači, to znamená, že fyzický měřicí přístroj s rozhraním je v tomto případě pouze prostředníkem, který poskytuje data ve vhodné podobě dalšímu nadřazenému systému, v němž jsou data dále analyzována a zpracovávána. S použitím pouze jednoho vyhodnocovacího zařízení (měřicí karty) lze naprogramovat nepřeberné množství měřicích přístrojů. Aplikace se stává tzv. *virtuálním přístrojem*.

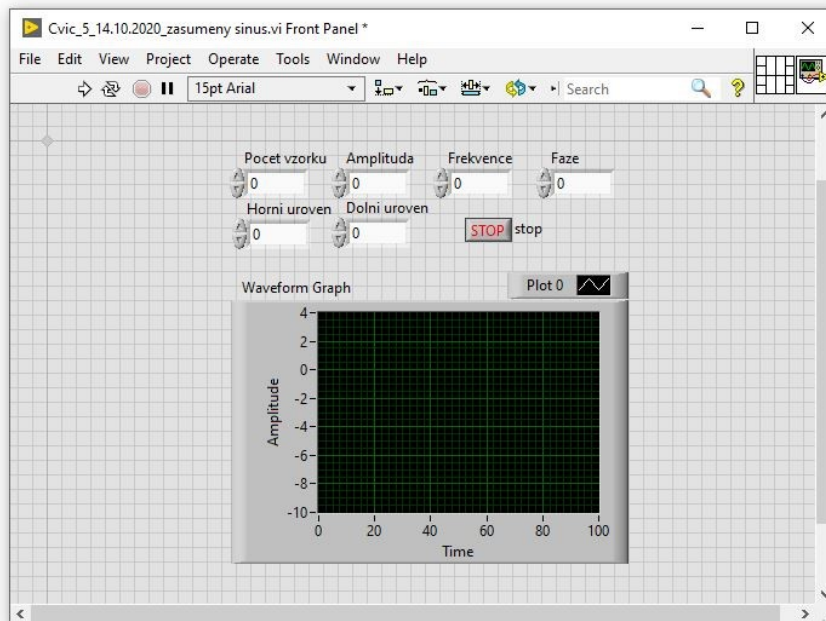
U moderních měřicích systémů mizí význam měřicího přístroje jako samostatného celku. Pro zpracování vstupních veličin slouží měřicí karta (hardware), která zpracovává vstupní veličiny na data určená pro analyzační software. Virtuální měřicí přístroje tak umožňují vytvářet měřidla, která přesně vyhovují nárokům uživatele. Výsledná cena jednoho virtuálního měřicího systému může být vyšší než celková částka za klasické měřicí přístroje, ale takto vytvořený přístroj je možno kdykoli upravit nebo přestavět. [22]

3.1 Vývojové prostředí LabVIEW

LabVIEW je programové prostředí určené pro tvorbu aplikací virtuálních přístrojů. Jedná se o komerční produkt americké společnosti *NI*,⁵ která se zabývá výrobou měřicí techniky. Charakteristikou *LabVIEW* je grafické vývojové prostředí. Jedná se o plnohodnotný programovací jazyk se všemi podstatnými strukturami a datovými typy – tzv. *G jazyk*. Pro tvorbu programu je zde užito grafických symbolů místo textu jako např. v *jazyce C*. Kód je tak přehledný a snadno modifikovatelný. Pomocí grafického znázornění má programátor lepší přehled nad vznikající prací a zároveň toto prostředí neklade velké nároky na znalost textového programování.

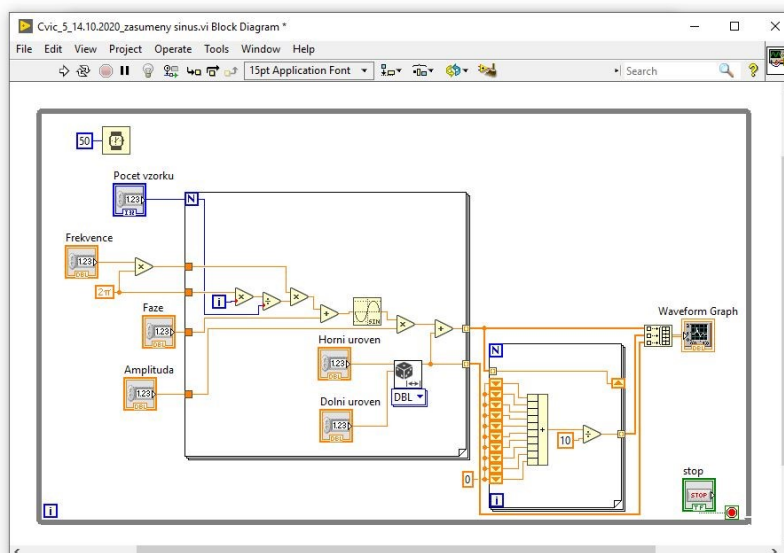
Vytvořený projekt v tomto prostředí se nazývá *virtuální instrument (VI)*, neboť je svým vzhledem a chováním velmi podobný fyzickému měřidlu. Přímě při programování uživatel tvoří jak vnitřní strukturu programu, tak i interaktivní grafické rozhraní GUI (angl. *Graphical User Interface*), též nazývané jako čelní panel. Zde lze umístit ovládací a signalizační prvky jako např. tlačítka, spínače, otočné knoflíky, signálky jako u klasického přístroje nebo grafy pro zobrazování průběhů veličin apod. Při samotném běhu programu tyto prvky obsluhuje ovládá myší nebo z klávesnice.

⁵ Do roku 2020 *National Instruments*.



Obr. 24 Příklad čelního panelu v prostředí LabVIEW

Vnitřní struktura programu je tvořena v blokovém diagramu. Toto schéma tvoří ikony (bloky) reprezentující funkce, vstupní parametry, cykly nebo indikátory. Jednotlivé bloky se mezi sebou spojují prostřednictvím vodičů (wires), které představují tok signálu. Ovládání je velice intuitivní a přehledné. Systém nabízí i četné ladičí prostředky, pomocí nichž lze kód spouštět krokováním, sledovat stavy proměnných pomocí tzv. sondy (probe) nebo pozastavovat běh programu na tzv. breakpointech.



Obr. 25 Příklad blokového diagramu v prostředí LabVIEW

Virtuální instrument může obsahovat i podprogramy, díky nimž získává celý systém hierarchickou strukturu. Programátor tak může rozdělit program na jednotlivé menší úseky, z nichž

potom tvoří celek aplikace jejich skládáním do výsledného virtuálního přístroje. Hotový virtuální instrument je možné přeložit do podoby .EXE spustitelného souboru a spouštět nezávisle na vývojovém prostředí na jiných počítačích, je však potřeba jednorázově instalovat LVRTE.

Vývojové prostředí *LabVIEW* obsahuje základní software, který lze libovolně rozšiřovat o další balíčky a funkce jako modul pro tvorbu aplikací s dotykovým ovládáním, modul pro tvorbu kódu s podporou Matlab skriptu, modul pro převod *LabVIEW* kódu do *jazyka C* a mnoho dalších. [22],[23]

4 Návrh řešení měření

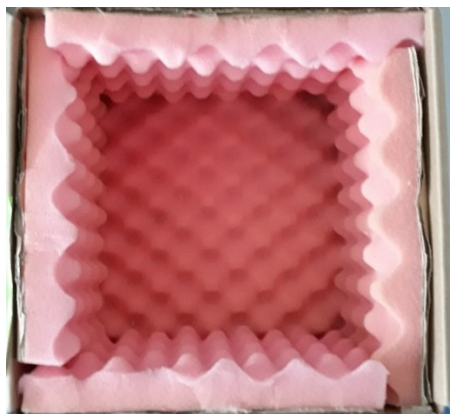
4.1 Výběr vhodného snímače

Původním záměrem bylo měřit zvuk hodinek pomocí kondenzátorových měřicích mikrofonů GRAS. Tikot byl v naměřeném signálu zřetelný, avšak nepoužitelný pro další zpracování kvůli značnému rušení, byť jen běžným hovorem v místnosti. Použití druhého odrušovacího mikrofonu nemělo na měření vliv stejně jako aplikace sluchátka lékařského fonendoskopu a vedení zvuku z něj k mikrofonu silikonovou hadičkou (Obr. 26).

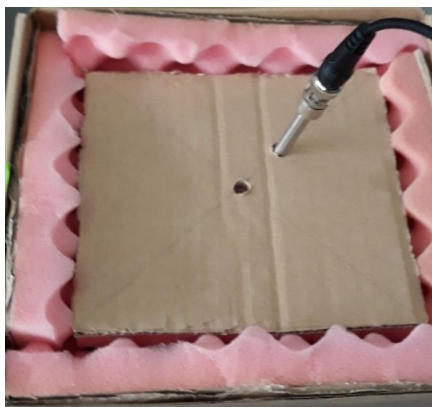


Obr. 26 Měření pomocí kondenzátorového mikrofonu a lékařského fonendoskopu (měřené hodinky leží na sluchátku, hadičkou je zvuk přiveden k dalšímu mikrofonu)

Měření se nezlepšilo ani umístěním hodinek do papírové krabice izolované molitanem (Obr. 27 a Obr. 28). Pro získání signálu muselo být v laboratoři zajištěno co nejtišší prostředí.

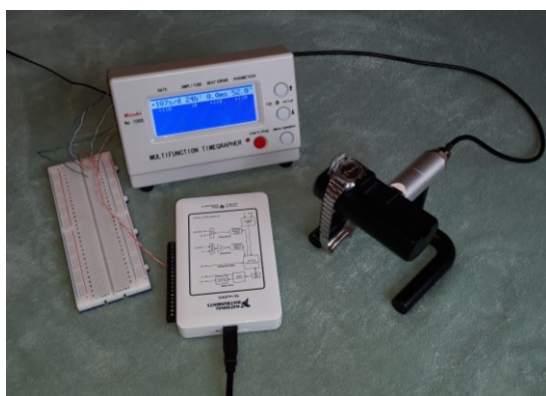


Obr. 27 Papírová krabice vystlaná tlumicí hmotou



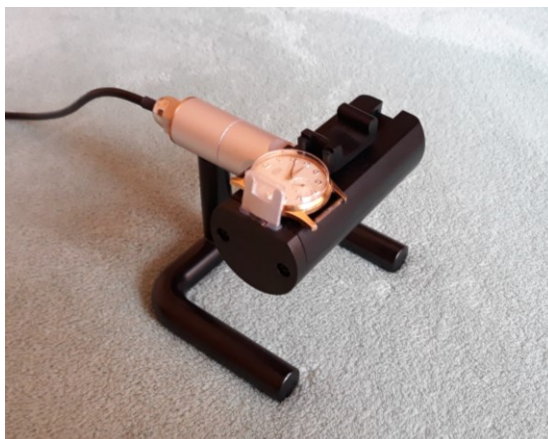
Obr. 28 Uzavřená krabice s hodinkami a měřícím mikrofonem

Lepších výsledků bylo dosaženo využitím snímače z továrně vyráběného časového komparátoru Weishi No 1000.



Obr. 29 Časový komparátor Weishi zapojení s měřicí kartou NI myDAQ

Tento přístroj obsahuje speciální hodinářský přípravek pro měření. Měřené hodinky se upínají do měřicí stoličky pomocí čelisti, která pružinou přitlačuje pouzdro hodinek k hliníkovému nosníku. Ten vede kmity až k integrovanému piezoelektrickému čidlu uvnitř pouzdra přístroje.



Obr. 30 Měřicí stolička s upnutými hodinkami

Stolička je z časového komparátoru napájena stejnosměrným napětím 8 V. K měření bylo využito výstupního signálu z měřicí stoličky. Ten byl zaveden přímo do měřicí karty NI myDAQ (Obr. 29).

4.2 Návrh virtuálního přístroje

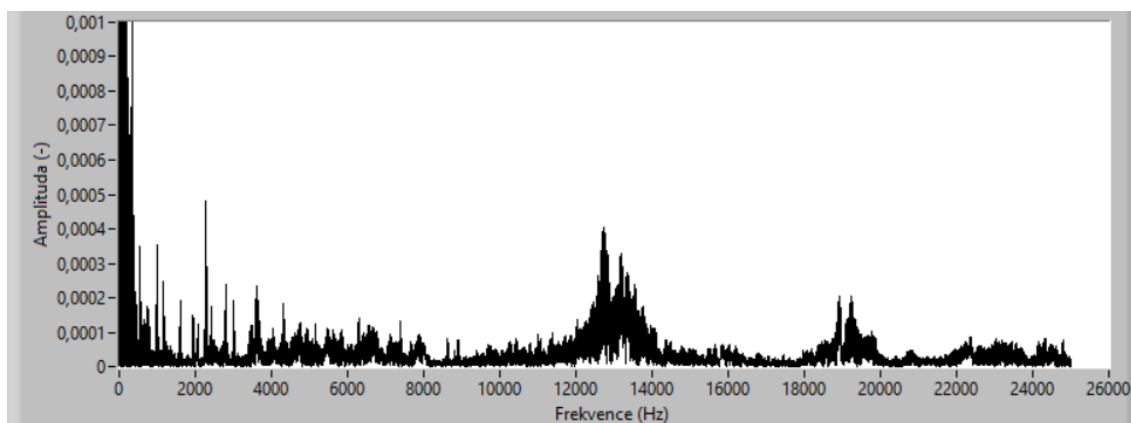
Implementace měřicího software byla provedena v LabVIEW. Pro měření byly vybrány troje hodinky: *Luč*, automat z 80. let; *Prim*, kalibr 50 ze 70. let a *Hamilton American Classic Intra-Matic Auto Chrono*.



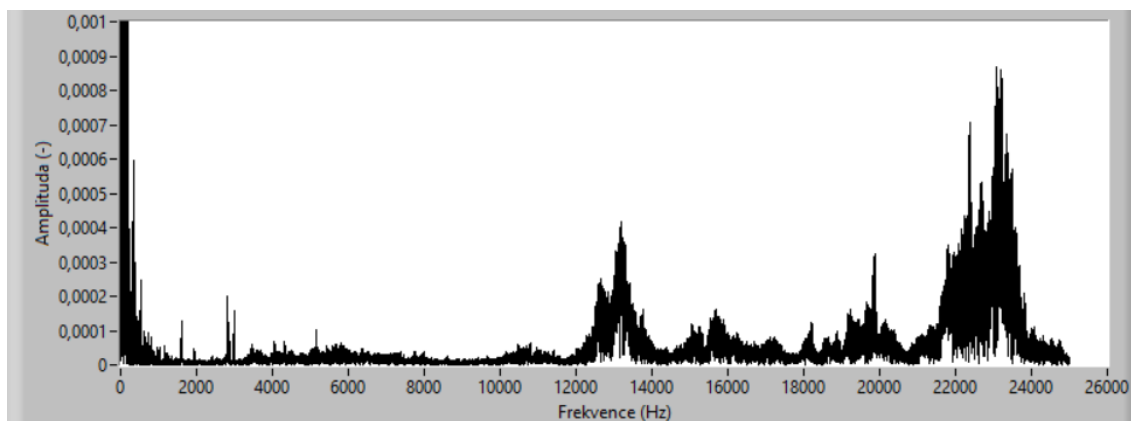
Obr. 31 Hodinky použité pro měření (zleva): Luč automat, Prim kalibr 50 a Hamilton American Classic

4.2.1 Nastavení vzorkovacích parametrů

Provedením spektrální analýzy signálu bylo zjištěno frekvenční rozložení složek zvuku hodinek (Obr. 32 a Obr. 33). Vzhledem ke geometrickým rozměrům náramkových hodinek a poslechu tikotu lze předpokládat, že frekvence impulsů bude ležet v oblasti vyšších slyšitelných frekvencí (10–20 kHz).



Obr. 32 Frekvenční spektrum hodinek Luč



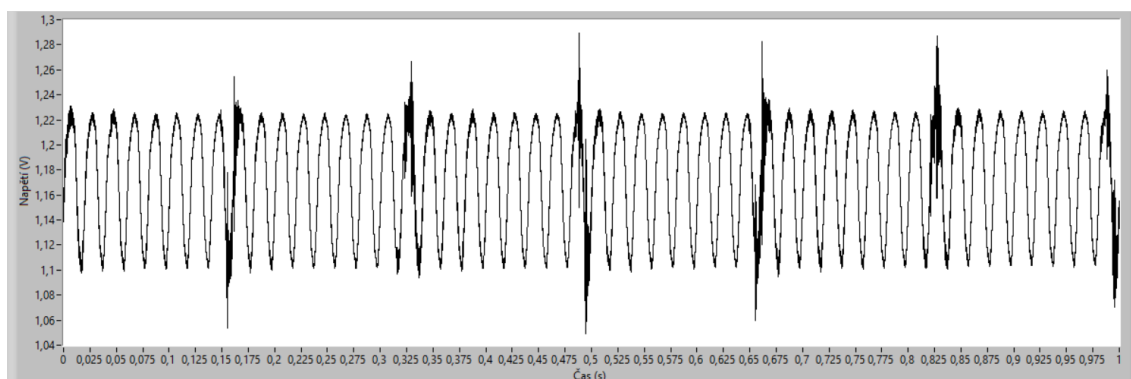
Obr. 33 Frekvenční spektrum hodinek Prim

Vidíme, že základní kmitočet úderů (tedy hluků, které vznikají v mechanismu) se u obou měřených strojků nachází v oblasti kolem 13 kHz. Další významné frekvence leží v okolí 19 kHz u hodinek Luč, hodinky Prim vykazují na vyšších kmitočtech větší amplitudu.

Vzorkovací frekvence byla nastavena na 50 kS/s a délka měřeného časového okna byla zvolena jedna sekunda. Dle naměřeného signálu (Obr. 34) byl zvolen rozsah převodníku špička-špička ± 5 V.

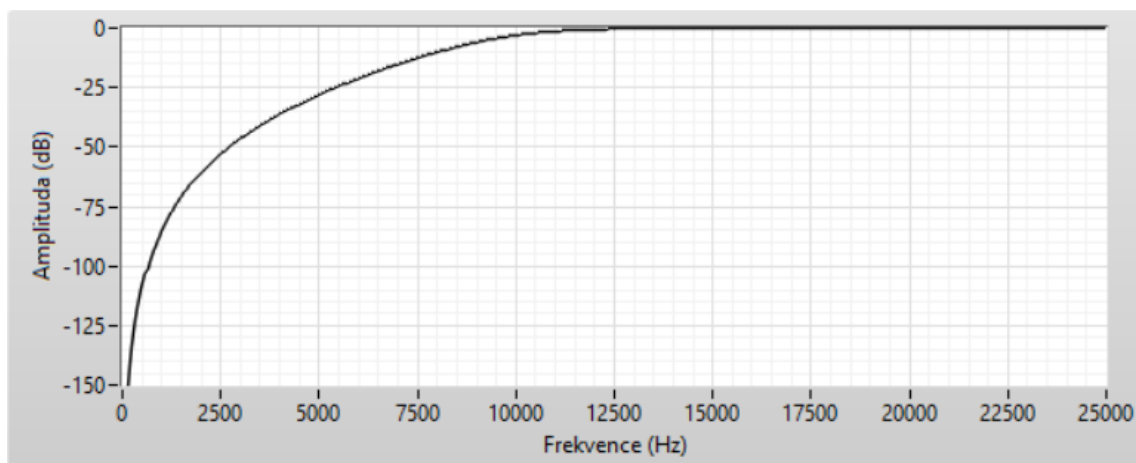
4.2.2 Filtrace signálu

Obr. 34 znázorňuje výstup přímo z měřicí karty. Amplituda signálu je přibližně 0,23 V. Signál vykazuje offset zhruba 1,17 V. Jednotlivé impulzy jsou na průběhu viditelné, ale signál značně ruší napětí o kmitočtu sítě 50 Hz:



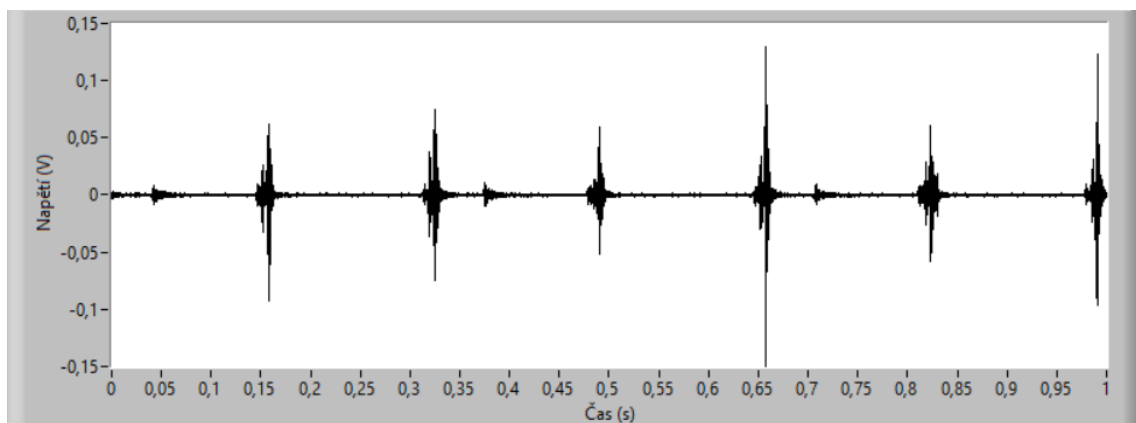
Obr. 34 Graf naměřeného signálu

Proto je nutno nízké kmitočty odfiltrovat. Na signál byl aplikován Butterworthův digitální IIR filtr typu horní propust řádu 4 o frekvenci řezu 10 kHz při zachování vzorkovací frekvence 50 kS/s. Návrh filtru byl proveden v programu *IIR filter design* volně dostupném v balíčku LabVIEW jako vzorové VI. Navržený filtr má příznivou amplitudovou charakteristiku při zachování stability a minimalizaci výpočetního času (Obr. 35):



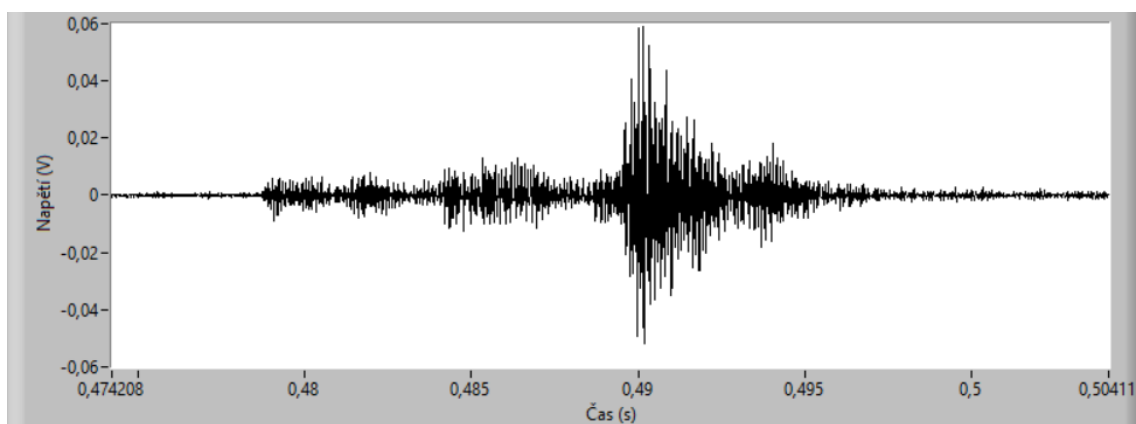
Obr. 35 Amplitudová frekvenční charakteristika vybraného filtru

Po filtraci jsou na signálu již dobře patrné jednotlivé impulsy tikotu hodinek (Obr. 36):



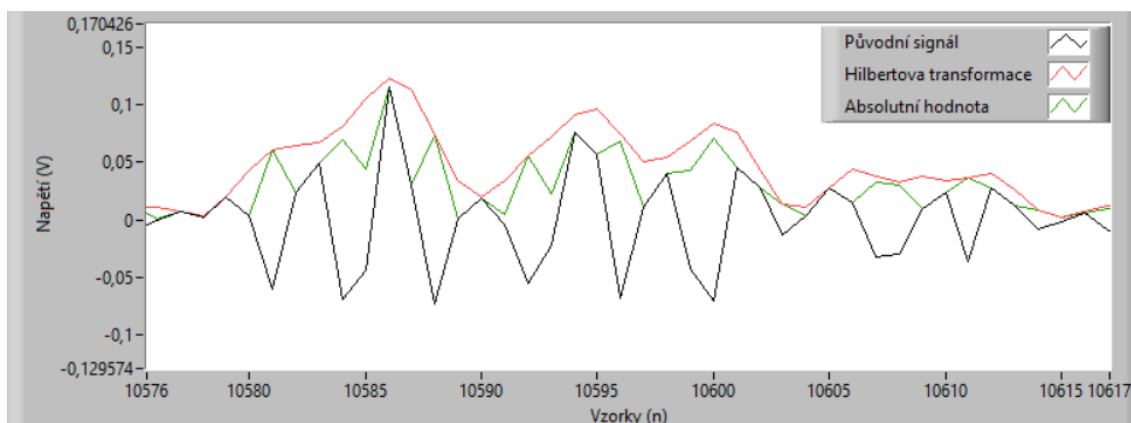
Obr. 36 Graf filtrovaného signálu

A po přiblížení lze vidět, že jsou věrně zachovány všechny tři úder v impulsu (Obr. 37):



Obr. 37 Detail jednoho impulsu po navzorkování signálu

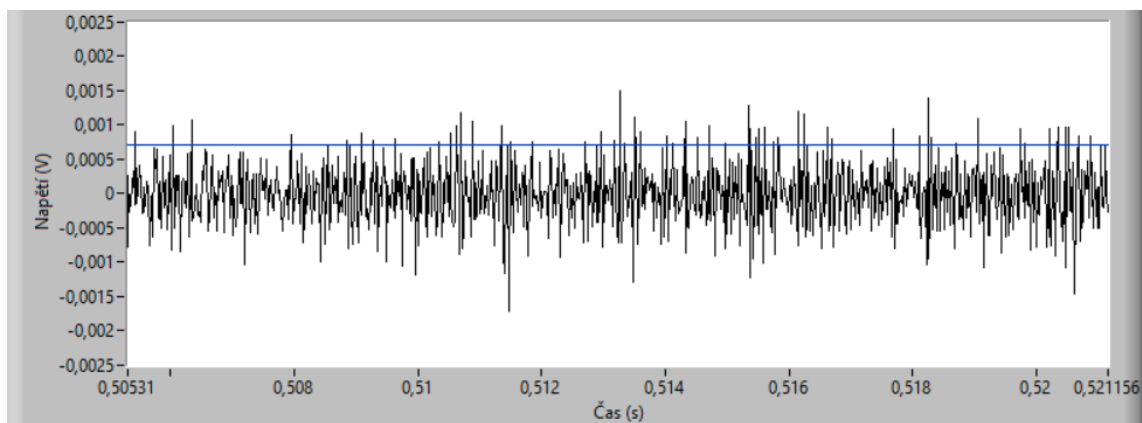
Vzhledem k tvaru signálu je vhodné hledat periody pomocí detekce lokálních maxim (špiček). Špičky se nacházejí v kladné i záporné části signálu (jde o kmitání), je proto výhodné pracovat jen s kladnou polorovinou signálu. Aplikací knihovni funkce *absolutní hodnota* (*absolute value*) dojde ke změně znamének záporných hodnot signálu na kladná. Toto odříznutí záporných hodnot není nezbytné, je však praktické zmenšením rozsahu hodnot signálu. Záporné špičky přejdou do kladné části a lze jich také využít k pozdější detekci. V *LabVIEW* je implementována funkce *Envelope detection*, která vytvoří ke vstupnímu signálu obalovou křivku. Při experimentálním ověření však bylo zjištěno, že lokální maxima této funkce nekorespondují s maximy původního signálu. Totéž bylo zjištěno i u přímé aplikace Hilbertovy transformace (která je mj. ve funkci *Envelope detection* obsažena), proto se funkce absolutní hodnota jeví jako nejvýhodnější (Obr. 38).



Obr. 38 Porovnání metod pro získ obálky signálu

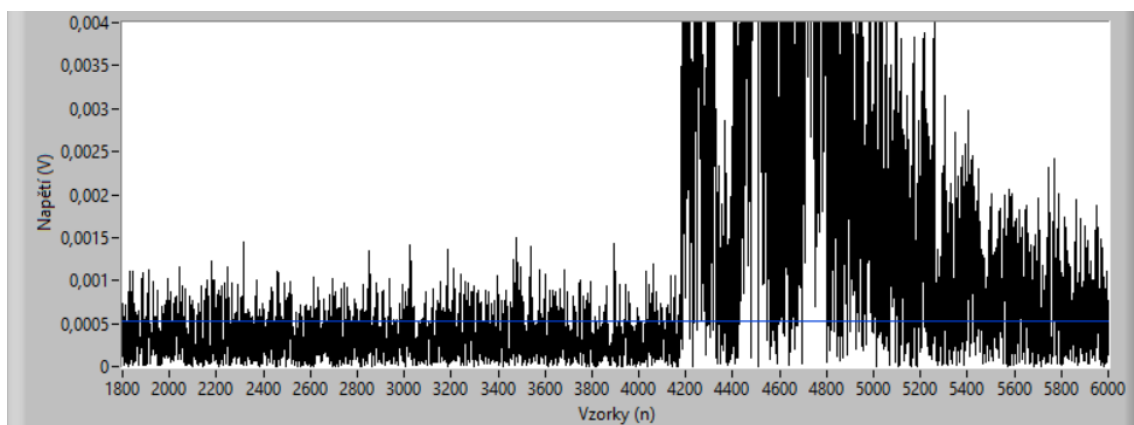
4.2.3 Odstranění šumu

Nejvyšší hodnota impulsu (třetí úder) je již poměrně dobře detekovatelná i bez dalších úprav signálu. Nelze však korektně rozpoznat pozici prvního úderu (Obr. 37). Žádaný signál obsahuje šum, který by mohl zkreslovat další měření. Odstranění šumu bylo provedeno jednoduchým anulováním hodnot, které nedosahují nastavené prahové úrovně (prahu citlivosti). Protože velikost šumu je dána do jisté míry okolními vlivy, nebylo by nastavení paušální hodnoty prahu citlivosti účinné. Proto je v aplikaci použit statistický výpočet nejčtenější hodnoty – modu z celého časového okna. Impulzy tvoří v porovnání se šumem jen malou část okna, modus signálu je tedy zhruba roven amplitudě šumu. Trojnásobek modu pak tvoří námi zvolený práh citlivosti. Nad touto empiricky zjištěnou hodnotou se bude šum vyskytovat již jen s velmi malou pravděpodobností.

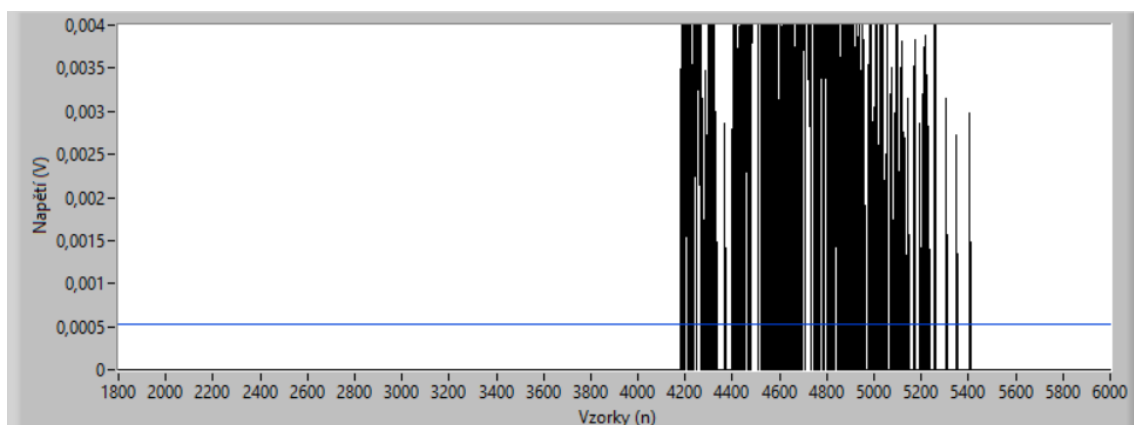


Obr. 39 Šum v signálu a jeho hodnota modu (modře)

Obr. 39 a Obr. 40 zobrazují část signálu těsně před impulsem:



Obr. 40 Zašuměný signál

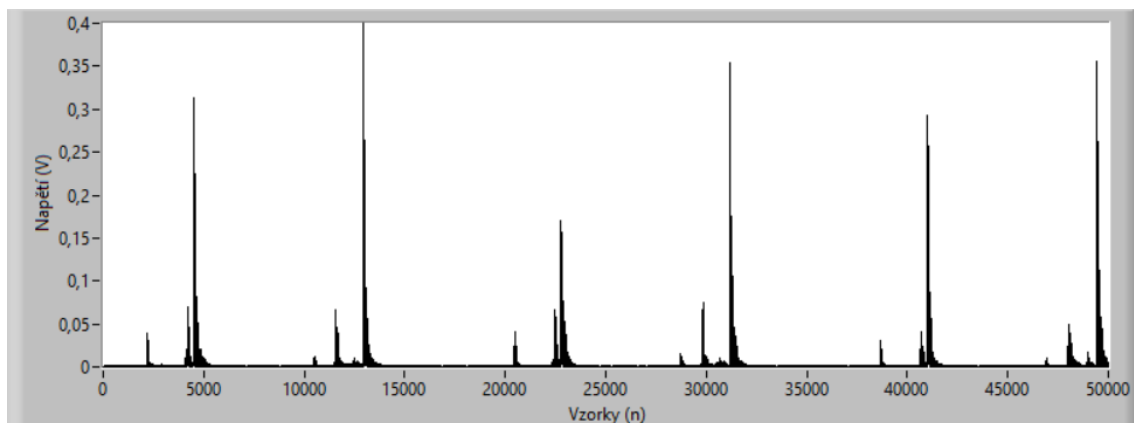


Obr. 41 Signál po odstranění šumu

4.2.4 Normalizace signálu

Filtrovaný signál zbavený šumu je nutné normalizovat, aby bylo minimalizováno riziko chybné detekce impulsů. V některých případech je možné, že amplituda druhého úderu bude větší než

polovina amplitudy maxima, což může vést přímou aplikací např. knihovní funkce *Peak detector* k nechtěné detekci prvního a druhého úderu z impulsu. Některá maxima by naopak mohla být menší než prahová úroveň detektoru a nemusela by být detekována. Normalizace celého časového okna není pro tento typ signálu vhodná, neboť by mohla některé špičky zmenšit na úkor nejvyšší hodnoty v časovém okně jako např. na Obr. 42.

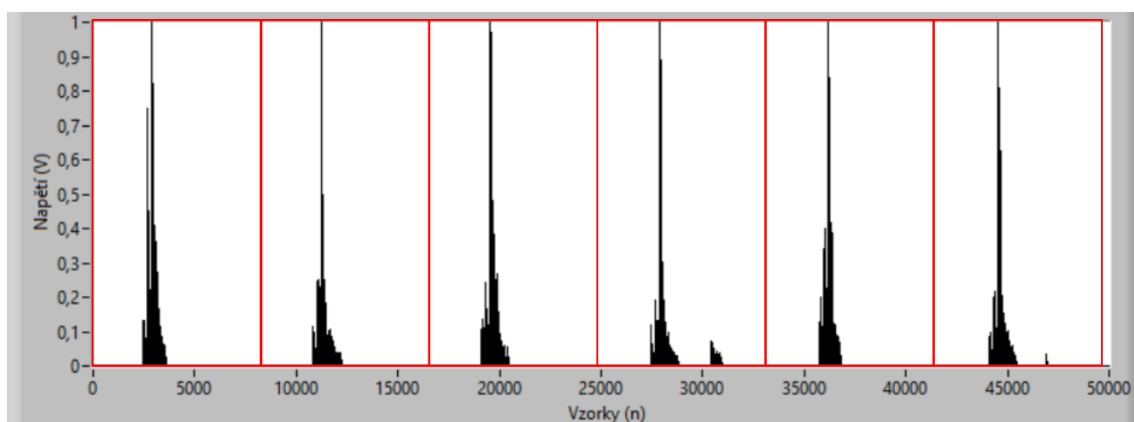


Obr. 42 Upravený signál bez šumu

Proto je celé časové okno rozděleno na počet podoken rovný počtu impulsů v celém časovém okně. Vzhledem k délce časového okna 1 s je tento počet je vlastně roven frekvenci hodinek. Tím je zajištěno, že v každém podokně bude obsažen právě jeden impuls. Každé podokno je normalizováno podle maxima v něm obsaženém. Normalizovaná hodnota signálu u_{ni} vznikne podělením hodnoty původního signálu u_i maximální hodnotou signálu v daném časovém intervalu:

$$u_{ni} = \frac{u_i}{\max(u)} \quad (23)$$

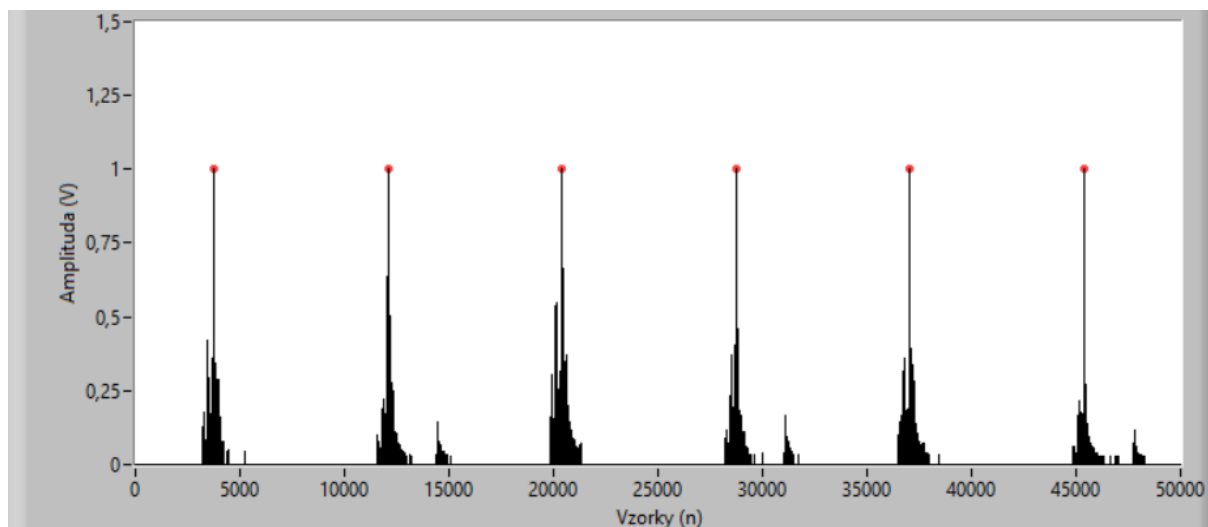
Tím je zajištěna stejná výška všech lokálních maxim, která budou po této úpravě snadněji detekovatelná (Obr. 43).



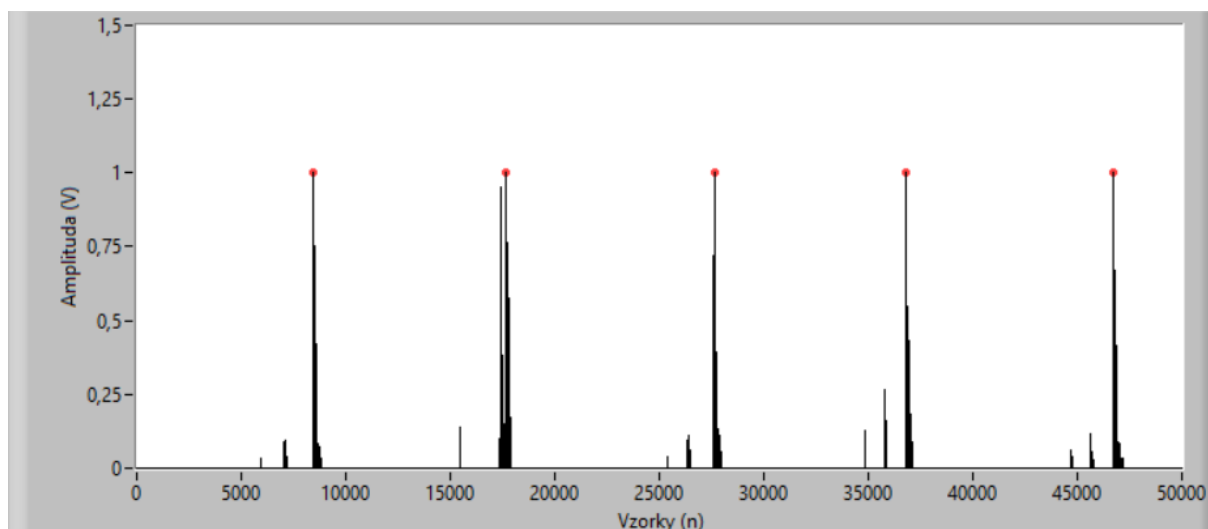
Obr. 43 Rozdělení normalizovaného signálu na dílčí podokna

4.2.5 Hledání lokálních maxim

V normalizovaném signálu již lze detekovat lokální maxima např. jako hodnoty rovné jedné.



Obr. 44 Detekce špiček u hodinek Luč



Obr. 45 Detekce špiček u hodinek Prim

4.2.6 Výpočet hodnot

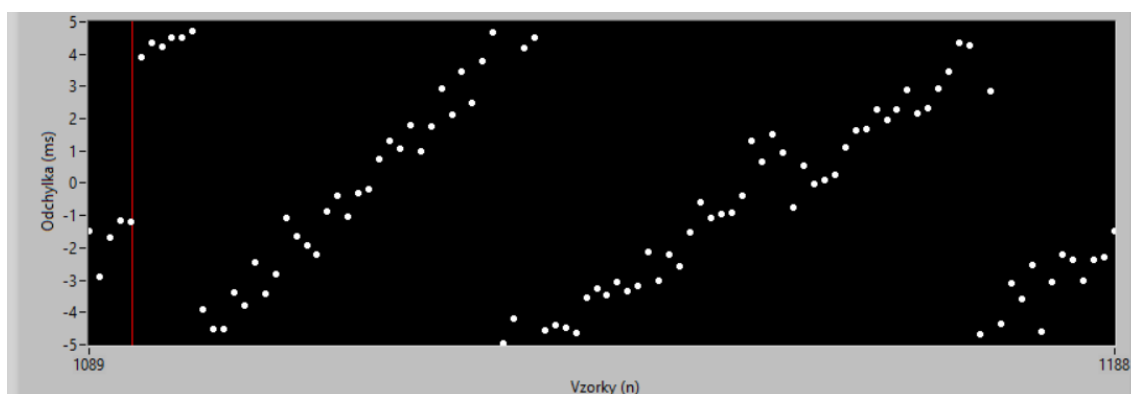
Výstupem funkce pro nalezení maxim je matice pozic špiček v časovém okně. Po jejím vynásobení intervalem dt získáme časové hodnoty špiček. Výběrem hodnot z matice a jejich rozdílem jsou získány časové intervaly t_1 , t_2 , t_a a t_b . Podle vzorce (19) pak je zjištěna hodnota kulhání a výpočtem podle vzorce (18) i hodnota normované periody, časový přírůstek, a tedy i hodnota denní odchylky mechanismu. Vypočtené hodnoty jsou cyklicky načítány do bufferu, z něž je pak počítán aritmetický průměr. Počet hodnot v bufferu, a tedy i jeho velikost, je zadávána uživatelem.

4.2.7 Výpočet rozkmitu setrvačky

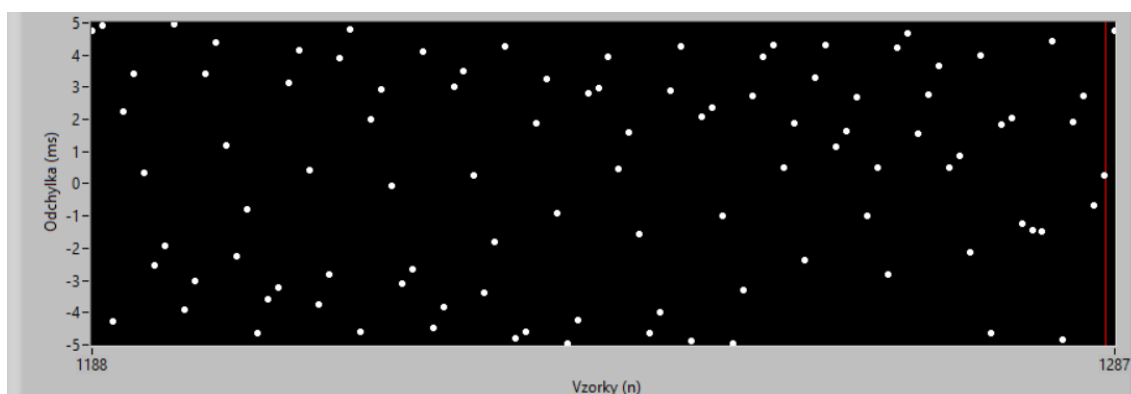
Pro detekci rozkmitu setrvačky byl vybrán časový rozdíl mezi náběžnou hranou prvního úderu a maximem třetího úderu (viz kap. 2.3.3 Rozkmit setrvačky). Z časového okna je vybrán prostřední impuls, čímž je zaručeno, že zvukový obraz jednoho impulsu bude vybrán celistvý (resp. se všemi třemi údery, viz kap. 2.2 Akustický signál hodinek) a nebude ořezán okrajem časového okna. Podle vzorce (20) je pak dopočítána hodnota amplitudy setrvačky. Uživatel pro tento výpočet vkládá do přístroje hodnotu popudného úhlu ve stupních. Data jsou stejně jako v předcházejícím případě také nahrávána do bufferu, z nějž jsou potom vyčítána k výpočtu průměrné hodnoty.

4.2.8 Provedení zobrazení vibrografu

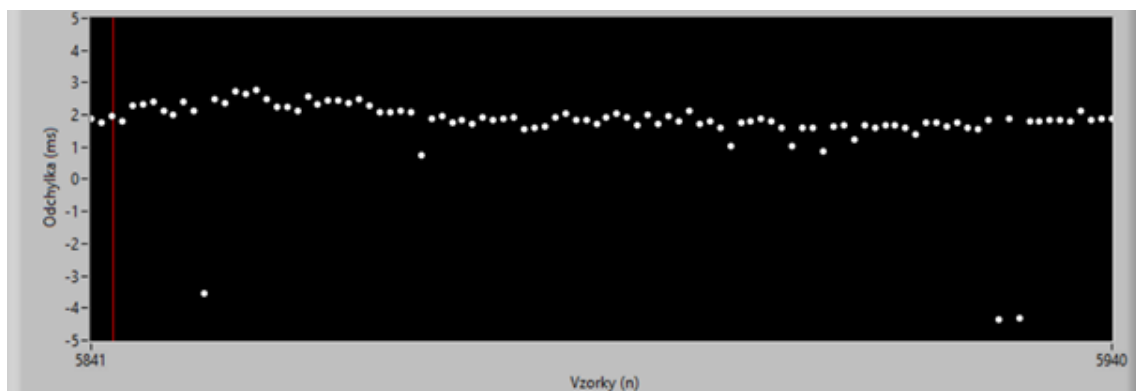
Ze zjištěných časových intervalů mezi jednotlivými údery je odečtem od referenční hodnoty zadávané uživatelem vypočten časový přírůstek na každém úderu. Pomocí vzorce (21) a (22) je získána časově proměnná hodnota $y[k]_{vib}$, která je zobrazena do grafu typu CHART:



Obr. 46 Vibrograf pro hodinky Luč



Obr. 47 Vibrograf pro hodinky Prim



Obr. 48 Vibrograf pro hodinky Hamilton

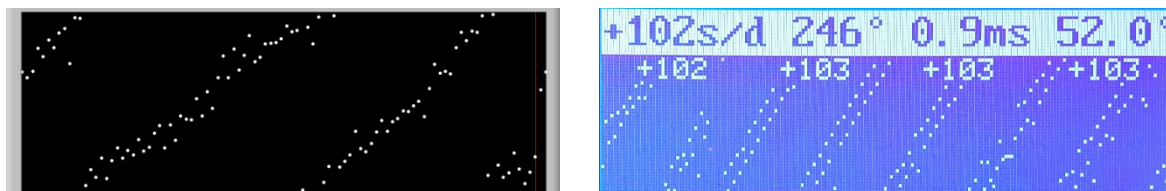
Výše jsou uvedeny grafické výstupy z měření reálných hodinek na virtuálním přístroji. Na Obr. 46 je ukázka vibrografu pro hodinky Luč, které se předcházejí a mají nestejnou délkou kyvů. Hodinky Prim (Obr. 47) mají dle vibrografu velkou denní odchylku (řada bodů strmě klesá). Hodinky Hamilton vykazují poměrně přesný chod se zřetelným kulháním (Obr. 48).

4.2.9 Srovnání s továrně vyráběným přístrojem

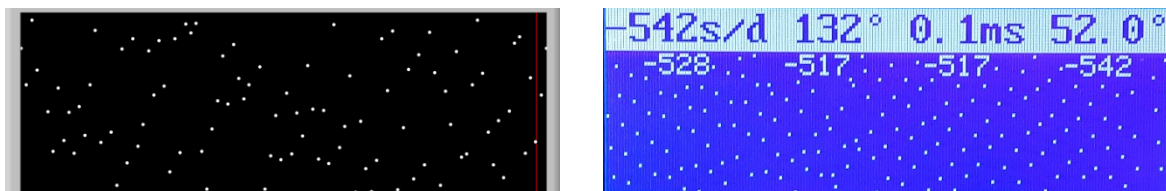
Pro ověření správnosti funkce vytvořeného virtuálního přístroje bylo provedeno měření na přístroji *Weishi No. 1000*. V Tab. 4 jsou zaznamenány hodnoty změřené virtuálním přístrojem v porovnání s daty získanými z přístroje *Weishi*. Grafické výstupy obou přístrojů je přibližně stejné, viz Obr. 49 a Obr. 50.

| Tab. 4 Porovnání vypočtených hodnot s přístrojem Weishi | | |
|--|-----------|-----------------|
| | LabVIEW | Weishi No. 1000 |
| Hodinky Prim, kalibr 50, 70. léta 20. století | | |
| Kulhání (ms) | 0,059 | 0,1 |
| Denní odchylka (s/d) | -963,792 | -542 |
| Amplituda setrvačky (°) | 105,118 | 132 |
| Hodinky Luč, 80. léta 20. století | | |
| Kulhání (ms) | -0,231667 | 0,9 |
| Denní odchylka (s/d) | 161,568 | 102 |
| Amplituda setrvačky (°) | 235,347 | 246 |
| Hodinky Hamilton American Classic Intra-Matic Auto Chrono | | |
| Kulhání (ms) | 0,05 | 0,0 |
| Denní odchylka (s/d) | 7,456 | 6 |
| Amplituda setrvačky (°) | 267,275 | 295 |

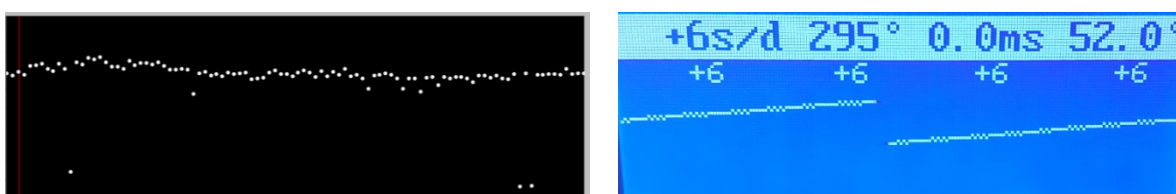
Hodnoty v Tab. 4 se přibližně shodují. Shoda je i mezi vibrografy:



Obr. 49 Srovnání vibrografů pro hodinky Luč

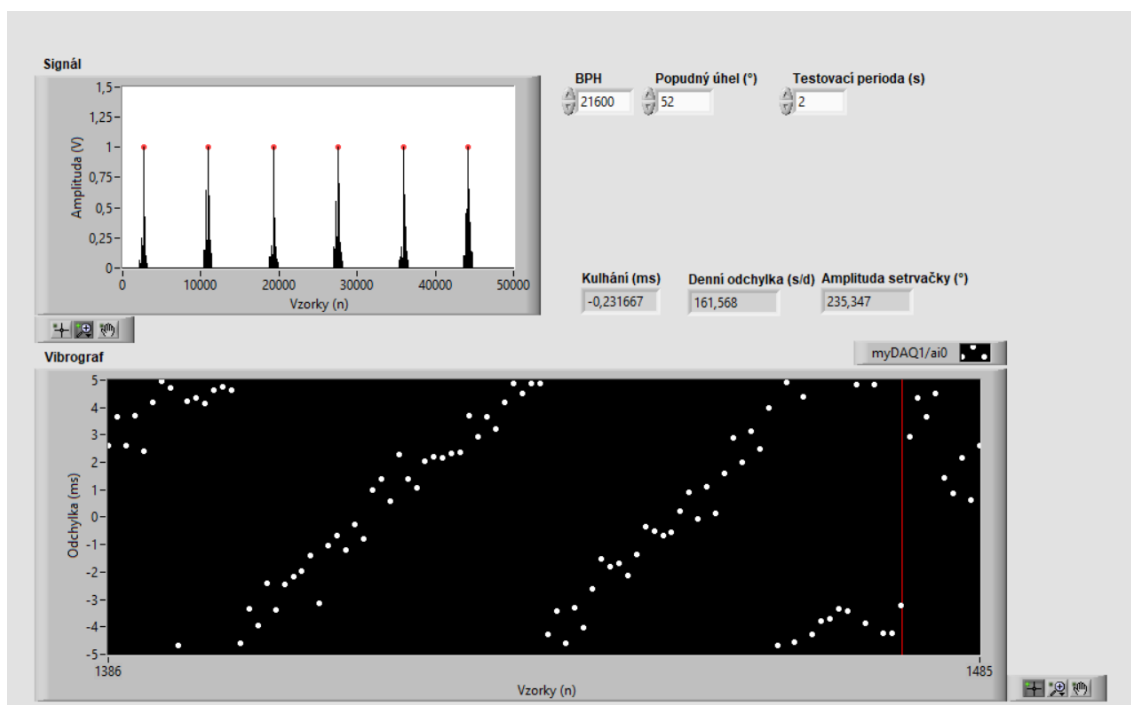


Obr. 50 Srovnání vibrografů pro hodinky Prim



Obr. 51 Srovnání vibrografů pro hodinky Hamilton

Obr.52 představuje čelní panel vytvořeného software. Uživatelé jsou zobrazeny číselné hodnoty a grafický výstup v podobě vibrografu a časového průběhu signálu s indikací nalezených maxim:

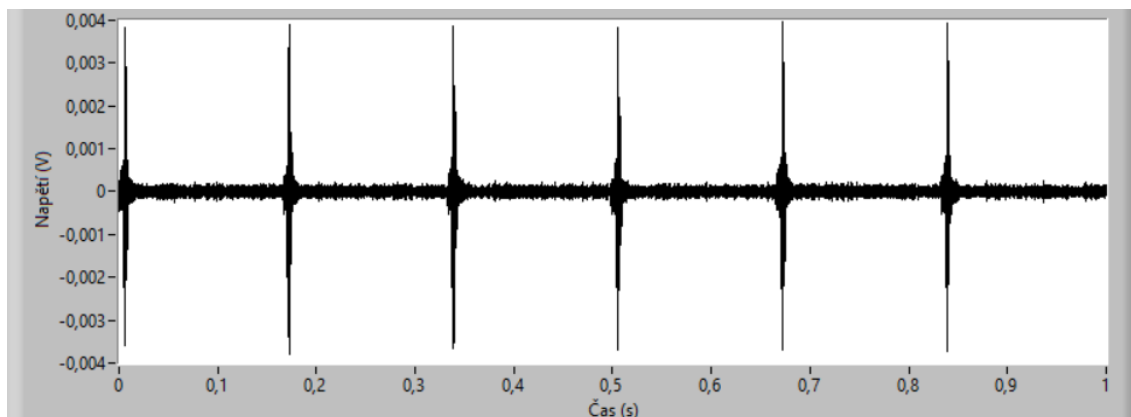


Obr.52 Ukázka z čelného panelu SW

Uživatel do virtuálního přístroje zadává počet kyvů strojku za hodinu, popudný úhel a testovací periodu, po kterou jeden cyklus měření probíhá.

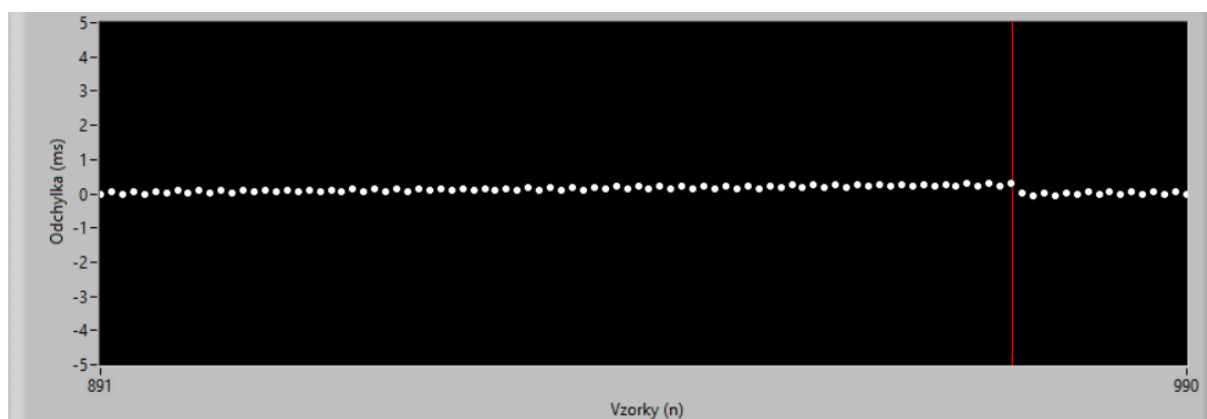
4.2.10 Ověření přesnosti

Pro zjištění přesnosti měření byly ve zvukovém editoru vytvořeny z nahraného zvuku hodinek umělé referenční signály o frekvenci 21600 a 18000 kyvů za hodinu. Nakopírováním jednoho impulsu z nahrávky v přesných časových intervalech vznikl desetisekundový periodický záznam shodných impulsů, který je cyklicky opakován, což napodobuje reálné měření. Tyto uměle vytvořené signály by měly vykazovat konstantní odchylku, kulhání i amplitudu setrvačky.



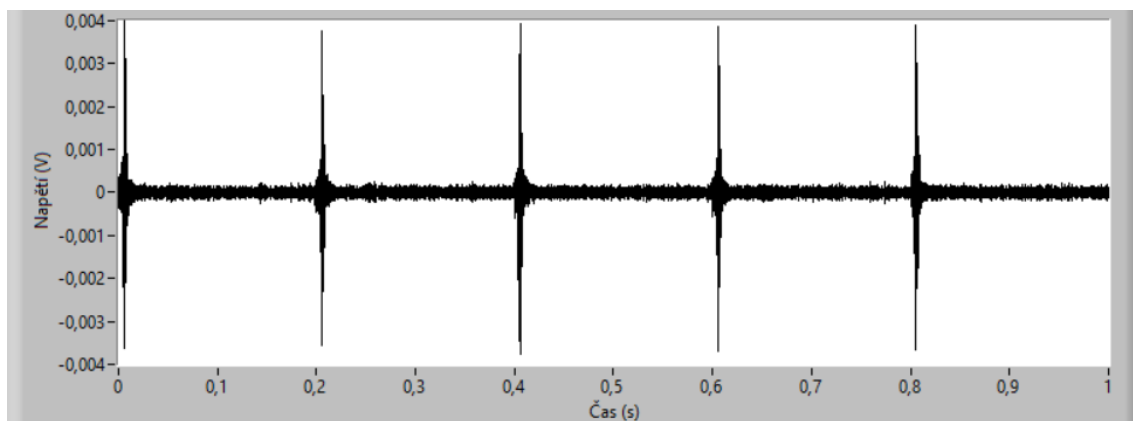
Obr. 53 Umělý signál č. 1 o frekvenci 21600 BPH

Na Obr. 53 je zobrazen časový průběh umělého signálu č. 1 o frekvenci 21600 BPH. Při měření bylo na výstupu přístroje zjištěno konstantní kulhání 0,00566893 ms. Denní odchylka +2,93878 s a amplituda 47,6457 ° byly po celou dobu měření rovněž konstantní. Zobrazený vibrograf (Obr. 54) odpovídá naměřeným hodnotám. Je zde patrné mírné zpoždování a nejednotnost vzniklé čáry, což je způsobeno mírným kulháním:



Obr. 54 Vibrograf signálu č. 1

Pro syntetický signál č. 2 (Obr. 55) o frekvenci 18000 BPH byla denní odchylka a hodnota kulhání nulová. Amplituda setrvačky pravidelně oscilovala mezi 47 a 48 stupni, což je zřejmě důsledek chybné detekce první náběžné hrany v impulsu vlivem příliš velkého šumu.



Obr. 55 Umělý signál č. 2 o frekvenci 18000 BPH

Vibrograf na Obr. 56 odpovídá změřeným hodnotám. Přesně jdoucí mechanismus je na vibrografu zobrazen jako vodorovná čára (viz Tab. 3).



Obr. 56 Vibrograf signálu č. 2

Závěr

V dnešní době elektroniky a přesných quartzových strojů se může zdát, že tradiční mechanické hodiny se pomalu stávají minulostí. Opak je však pravdou, um mistrů hodinářů zůstává i nadále obdivován jako ušlechtilé řemeslo, které má i dnes mnoho příznivců.

Cílem této bakalářské práce bylo vytvořit v LabVIEW praktický hodinářský přístroj určený pro základní diagnostiku stavu hodinového stroje. Zásadní vliv na kvalitu měřeného signálu má prvotní článek měřicího řetězce – mikrofon. Použití mikrofону se však ukázalo pro naše účely jako nevhodné. I v praxi se s touto metodou měření spíše nesetkáme. Přestože byly zkoušeny různé způsoby snímání, nebylo dosaženo vyhovujících výsledků. Rušení okolními zvuky způsobilo nežádoucí pokles kvality signálu.

Pomocí speciální měřicí stoličky tovární výroby byl získán signál dostatečné kvality vhodný k dalšímu zpracování. Po korektní diskretizaci a úpravě signálu v podobě filtrace, normalizace a odstranění šumu byla provedena analýza v podobě vyhodnocení jednotlivých délek period a půlperiod. To bylo provedeno vyhledáním pozic lokálních maxim signálu v rámci časového okna. Ze znalosti pozic těchto maxim jsou vypočítány požadované hodnoty. Ty jsou zobrazeny uživateli společně s grafickým výstupem „vibrografu“.

Srovnání s konvenčním hodinářským přístrojem potvrdilo správnost vypočtených hodnot i grafického výstupu. Přestože se hodnoty mírně odlišují, grafické zobrazení se na obou přístrojích shoduje. Při ověření přesnosti pomocí uměle vytvořeného signálu nebyla odchylka pozorována. Přestože bylo zpracování a vyhodnocení signálu provedeno na běžném počítači, můžeme konstatovat, že měření námi vytvořeným zařízením je vzhledem k maximální dosažitelné přesnosti mechanických hodin dostatečně přesné. Metodu akustického měření by bylo vhodné doplnit optickým vysokorychlostním snímáním pohybu setrvačky a případně tyto dva způsoby měření porovnat.

Literatura

- [1] KADLEC, František, Libor HUSNÍK a Stano PEKÁR. Zpracování slabých akustických signálů malých živočichů zaznamenaných v neoptimálních podmínkách. In: *Proceedings of Matlab*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra radioelektroniky a Masarykova univerzita, Přírodovědecká fakulta, Katedra zoologie a ekologie, 2004, s. 208–213.
- [2] NEŘIVA, Pavel a Martin PIEŠ. *Signály a soustavy: učební text a návody do cvičení*. Vydání první. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2012.
- [3] Omega Engineering. Low-mass laboratory accelerometers for high vibration levels [technická dokumentace k výrobku] [online]. Omega Engineering, Inc., © 1995–2021. Dostupné z: <https://www.omegaeng.cz/pptst/ACC104A.html>
- [4] ČSN EN ISO 266. *Akustika – Vyvolené kmitočty*. Praha: Český normalizační institut, ©1999. 7 s. Třídící znak 01 1601.
- [5] MONSPORTOVÁ, Lucie. *Analýza zvukového signálu pomocí programu Matlab*. Ostrava, 2015. Diplomová práce. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky. Vedoucí práce Richard Velička.
- [6] GRAS SOUND AND VIBRATION. *¼" CCP Pressure Standard Microphone Set, High Sensitivity* [informační brožura k výrobku] [online]. Gras Sound and Vibration, 2021 [cit. 2021-01-11]. Dostupné také z: https://www.grasacoustics.com/products/measurement-microphone-sets/product/ss_export/pdf2?product_id=542
- [7] [SKŘIVÁNEK]. Typy mikrofonů. In: *Analog digital music* [online]. [cit. 2020-12-20]. Dostupné z: <https://admmagazin.cz/mikrofony-01-typy-mikrofonu/>
- [8] ELEKTROAKUSTIKA. Konstrukce mikrofonů. *Elektroakustika.cz* [online]. [cit. 2021-01-12]. Dostupné z: https://www.elektroakustika.cz/types_microphones.html#carbon
- [9] REICHL, Jaroslav. Encyklopedie fyziky [online]. *Fyzika.jreichl.com*. © 2006–2021 [cit. 2021-04-24]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com>
- [10] ŠAFAŘÍK, Jan R. Páskové mikrofony: Technologie nalezená na půdě aneb utahování pásků na zvukařský způsob. *Music store: Odborné texty (nejen) pro muzikanty a zvukové techniky* [online]. Pardubice: Promedia Czech, 2013, č. 4 [cit. 2020-12-20]. ISSN 1212-1029. Dostupné z: <https://www.music-store.cz/clanky/paskove-mikrofony>
- [11] BURDA, Zdeněk. Mikrofony. *Zdendův zápisník* [online]. 13.1.1999 [cit. 2020-12-16]. Dostupné z: <http://www.zdenda.com/1999/01/mikrofony/>
- [12] BILÍK, Petr et al. *Virtuální instrumentace 2: učební text a návody do cvičení*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2012.
- [13] POKORNÝ, Miroslav a Radovan HÁJOVSKÝ. *Elektronická měření a přístroje: učební text a návody do cvičení*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2012.
- [14] ABREU, Renato, Lucas CORDEIRO a Eddie FILHO. *Verifying Fixed-Point Digital Filters using SMT-Based Bounded Model Checking* [online]. 2013 [cit. 2021-03-30]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/236688224_Verifying_Fixed-Point_Digital_Filters_using_SMT-Based_Bounded_Model_Checking
- [15] BUREŠ, Josef. *Hodinové stroje: pro I. ročník odborných učilišť a učňovských škol, učební obor 24632 – hodinář, hodinářka*. Vydání třetí. Praha: SPN, 1975.

- [16] MARTÍNEK, Zdeněk a Jaroslav ŘEHOŘ. *Základy hodinářstva: úvod do hodinářského oboru vhodný pro samostatné studium, školenie a informáciu*. Vydání 4. Bratislava: Alfa, 1987.
- [17] HAJN, Miroslav. *Základy jemné mechaniky a hodinářství: přehled přesné mechaniky v celém rozsahu s podrobným pojednáním o hodinářské technice*. Praha: Práce, 1953. Technické příručky Práce
- [18] WITSCHI ELECTRONIC. Grundkurs: Uhren-Messtechnik und Fehleranalysen [online]. *Witschi Electronic AG*, ©2002-2012 [cit. 2020-12-20]. Dostupné z: <https://www.witschi.com/assets/files/sheets/Witschi Grundkurs.pdf>
- [19] FILIPENSKÝ, Otomar a Helena KINTŠNEROVÁ. *Technológia hodinářstva II: pre 2. ročník SOU učebného oboru hodinár*. Bratislava: Alfa, 1989.
- [20] DOHNAL, Marek. *Akustická analýza mechanických hodinek*. Brno, 2015. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Milan Sigmund.
- [21] FILIPENSKÝ, Otomar. *Technológia hodinářstva III: pre 3. ročník SOU učebného oboru hodinár*. Bratislava: Alfa, 1989.
- [22] KOVAL, Ludvík a kol. *Elektrická měření: učební text a návody do cvičení*. Vydání první. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2012.
- [23] WITTASSEK, Tomáš. *Virtuální instrumentace I: učební text*. Vydání první. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2012.
- [24] MALENOVSKÝ, Vladimír. Adaptivní filtrace zašuměných řečových signálů. *Elektrorevue*. [online]. 27.11.2002 [cit. 2020-12-16]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/02063/index.html>
- [25] SU, Shuang a Ruxu, DU. Signature analysis of mechanical watch movements. *Mechanical systems and Signal Processing*. Roč. 2007, č. 21, s. 3189-3200.
- [26] WITSCHI ELECTRONIC. Prüf- und Messtechnik für mechanische Uhren. *Witschi Electronic AG*, ©2010 [cit. 2020-12-20]. Dostupné z: <https://www.witschi.com/assets/files/sheets/Prueftechnik fuer mechanische Uhren.pdf>
- [27] MIKROCONTROLLER. Zeitwaage zum Einmessen mechanischer Uhren. *Mc.mikrocontroller.com* [online]. ©1999-2007 [cit. 2020-12-20]. Dostupné z: <http://mc.mikrocontroller.com/de/Zeitwaage.php>
- [28] PCZW UHREN. PC-Zeitwaage. *Pczw.uhren-mikl-com* [online]. [cit. 2020-10-9]. Dostupné z: <http://pczw.uhren-mikl.com/index.php?News>
- [29] CHRONOSKOP. Timegraphe manufacturer [online]. ©2016 [cit. 2020-10-2] Dostupné z: <https://www.lisit.net/chronoskop/>
- [30] ČMEJLA, Roman. *Adaptivní zpracování signálů – cvičení. Adaptivní lineární prediktor s algoritmem LMS* [online]. Dostupné z: <http://noel.feld.cvut.cz/vyu/ada/adacv/rcmejla/Ada4.html>
- [31] TRNKA, Milan. *Neinvazní měřící přípravky pro kontrolu přesnosti mechanických hodinových strojů*. Pardubice, 2017. Diplomová práce. Univerzita Pardubice, Fakulta elektrotechniky a informatiky. Vedoucí práce Martin Dobrovolný.

Seznam příloh

Příloha A:

Tato příloha v podobě ZIP souboru obsahuje software virtuálního měřicího přístroje a příslušné SubVI:

- *2021_KUB0425_BP_priloha.vi*
- *KUB0425_BP_SubVI1_Filtrace_a_normalizace.vi*
- *KUB0425_BP_SubVI2_Hledani_maxim.vi*
- *KUB0425_SubVI3_Vypocet_hodnot.vi*
- *KUB0425_SubVI4_Vypocet_amplitudy.vi*

Příloha je nahrána v IS Edison.